

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Utilisation du lidar terrestre pour la mesure de paramètres  
de tiges d'arbres en milieux naturels hétérogènes**

Caroline Rivest

Mémoire présenté pour l'obtention du grade Maître ès sciences géographiques (M.Sc.)  
cheminement télédétection

Août 2010

© Caroline Rivest, 2010

I-2469



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*  
ISBN: 978-0-494-79785-3  
*Our file Notre référence*  
ISBN: 978-0-494-79785-3

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

■+■  
**Canada**

Directeur de recherche: Richard Fournier, Université de Sherbrooke

Membres du jury :

Sylvain Delagrangé, Université du Québec en Outaouais

Alain Royer, Université de Sherbrooke

## Résumé

Les forêts représentent une ressource naturelle de grande valeur écologique et d'une valeur économique considérable. En fait, la superficie occupée par la forêt à l'échelle planétaire est estimée à 4 milliards d'hectares, soit **30% de la surface terrestre**. À lui seul, le Canada possède 10% de ces ressources forestières mondiales, et s'est vu conférer le titre du plus grand exportateur de produits forestiers en 2006 (RNCAN, 2009). Vu l'importance de la superficie occupée et le besoin de connaître davantage les paramètres de structure des arbres et des peuplements afin d'en assurer une gestion adaptée, il apparaît essentiel de recourir à des outils technologiques avant-gardistes. À cet égard, l'utilisation du **lidar (light detection and ranging) terrestre imageur** en foresterie suscite un intérêt sans cesse grandissant, et ce, afin de **bonifier les inventaires** sur le terrain. Des paramètres de structure tels que la **hauteur** de l'arbre, le diamètre à hauteur de poitrine (**DHP**) et le **défilement** de la tige et le volume peuvent s'avérer être des facteurs décisifs à la gestion des ressources forestières et à leur suivi. Divers projets de recherche ont permis de développer des outils de traitement de données lidars en milieu forestier, dont celui de la compagnie TreeMetrics en Irlande et celui de la Chair of Forest Yield Science de la Technische Universität München en Allemagne.

Dans le cadre du présent projet, l'objectif principal vise à **explorer le potentiel de ces deux outils (Autostem et R-Routine)** afin de traiter les données lidars provenant de divers milieux forestiers localisés au Canada et en Allemagne. Le défi majeur consiste à traiter les données de **milieux naturels et hétérogènes** provenant des sites d'étude localisés en Gaspésie (Québec, Canada). La complexité de ces sites représente une limite importante, principalement quant à la présence du sous-bois, à la *densité du couvert* et à la *présence de branches dans la partie inférieure du tronc*. Les mesures de la hauteur, du DHP et du défilement obtenues avec les deux logiciels pour des sites hétérogènes et homogènes sont confrontées aux mesures manuelles acquises sur le terrain, et ce, pour les 39 arbres étudiés. Une synthèse des forces et limites du lidar terrestre dans un contexte d'opérationnalité en milieu forestier est également présentée afin d'en arriver à un protocole de prise de mesures.

Suite au traitement des données, il a été possible d'obtenir **une précision de l'ordre du mètre pour ce qui est de la hauteur**, et ce, avec les deux logiciels, et dans les

deux types de peuplements. Pour le DHP, avec le logiciel Autostem, une sous-estimation moyenne de 5,8 cm a été observée pour les peuplements hétérogènes, comparativement à 6,5 cm pour les peuplements homogènes, alors qu’avec le logiciel R-Routine, la tendance est inversée, soit une surestimation de 3,5 cm pour les arbres de peuplements hétérogènes et 3,0 cm pour ceux de peuplements homogènes. Néanmoins, tout comme pour la hauteur, **l’erreur moyenne du DHP en milieu hétérogène et homogène** dans le cadre de cette étude **est comparable**, et ce, sans égard au logiciel utilisé. Finalement, les résultats de défilement obtenus sont contraires à ce qu’on aurait pu s’attendre, les erreurs des défilements en milieu hétérogènes, sont légèrement inférieures à celles en milieu homogène.

Quant aux forces et limites du lidar, notons tout d’abord l’avantage d’une représentation 3D des peuplements qui soit non subjective, de la possibilité de **conserver ces données** pour éventuellement les traiter à nouveau afin d’extraire d’autres paramètres avec des algorithmes, ou de faire un **suivi temporel** de l’évolution d’un peuplement. D’autre part, le **temps d’acquisition** représente un atout majeur de nombreux modèles de lidars, bien que leur utilisation puisse être restreinte en raison de l’accessibilité au site parfois restreinte en raison de la taille et du poids de l’équipement. De plus, bien que les scans puissent être effectués à tout moment dans l’année, il est préférable de les faire en absence de feuille, soit au printemps ou à l’automne; soit avant le débouffrage ou après la chute des feuilles. Néanmoins, l’atout majeur des données du lidar terrestre réside dans le **potentiel d’automatisation de l’extraction des paramètres** qui permet, entre autres, d’obtenir la **reconstruction des tiges**, d’évaluer le défilement de la tige, le DHP et la hauteur, et ce, avec une relativement bonne précision, sans abattre les arbres.

*Mots-clés : lidar terrestre, inventaire forestier, structure des tiges*

# TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	V
GLOSSAIRE .....	VI
REMERCIEMENTS .....	VII
1. INTRODUCTION .....	1
2. CADRE THÉORIQUE .....	4
2.1 Mesures traditionnelles .....	4
2.1.1 <i>Diamètre de la tige et des branches</i> .....	5
2.1.2 <i>Surface terrière</i> .....	6
2.1.3 <i>Hauteur</i> .....	6
2.1.4 <i>Volume</i> .....	8
2.2 Lidar terrestre .....	9
2.2.1 <i>Mesure du signal</i> .....	10
2.2.2 <i>Classifications des lidars</i> .....	13
2.2.3 <i>Le lidar terrestre en foresterie</i> .....	15
2.3 Objectifs et hypothèses .....	17
2.3.1 <i>Objectifs</i> .....	17
2.3.2 <i>Hypothèses</i> .....	17
3. MATÉRIEL .....	18
3.1 Sites d'étude .....	18
3.2 Lidars .....	21
3.3 Logiciels de prétraitement et traitement .....	23
3.3.1 <i>Prétraitement des données</i> .....	23
3.3.2 <i>Traitement des données</i> .....	24
4. MÉTHODOLOGIE .....	25
4.1 Acquisition des données .....	27
4.1.1 <i>Canada</i> .....	27
4.1.2 <i>Allemagne</i> .....	29
4.2 Prétraitement des données .....	30
4.2.1 <i>Canada</i> .....	30
4.2.2 <i>Allemagne</i> .....	32
4.2.3 <i>Création de fichier arbre</i> .....	32
4.3 Traitement des données .....	32

4.4	Proposition d'approches pour l'évaluation du diamètre .....	33
4.5	Diamètre des branches .....	34
4.6	Comparaison et analyse des résultats .....	36
5.	RÉSULTATS.....	36
5.1	Hauteur des tiges.....	36
5.2	Diamètre à hauteur de poitrine (DHP) .....	39
5.3	Surface terrière.....	41
5.4	Nouvelles approches proposées.....	43
5.5	Défilement de la tige .....	44
5.6	Volume .....	51
5.7	Diamètre des branches .....	52
6.	DISCUSSION .....	56
6.1	Interprétation des résultats .....	56
6.1.1	<i>Hypothèse 1 - mesures des métriques : hauteur, DHP et volume.....</i>	<i>56</i>
6.1.2	<i>Hypothèse 2 - défilement de la tige .....</i>	<i>58</i>
6.1.3	<i>Hypothèse 3 - potentiel d'opérationnalité de la méthode d'inventaire ..</i>	<i>58</i>
6.2	Forces et limites du lidar .....	59
6.2.1	<i>Mesure : peuplements hétérogènes vs homogènes .....</i>	<i>60</i>
6.2.2	<i>Hauteur.....</i>	<i>61</i>
6.2.3	<i>DHP.....</i>	<i>61</i>
6.2.4	<i>Surface terrière .....</i>	<i>62</i>
6.2.5	<i>Défilement.....</i>	<i>62</i>
6.2.6	<i>Volume .....</i>	<i>63</i>
6.2.7	<i>Diamètre des branches.....</i>	<i>63</i>
6.3	Protocoles de prise de mesures .....	63
6.3.1	<i>Choix de l'appareil .....</i>	<i>64</i>
6.3.2	<i>Période de scan .....</i>	<i>64</i>
6.3.3	<i>Conditions météorologiques .....</i>	<i>64</i>
6.3.4	<i>Préparation du site d'étude et alignement.....</i>	<i>65</i>
6.3.5	<i>Extraction des arbres et des paramètres.....</i>	<i>66</i>
7.	CONCLUSION.....	66
8.	RÉFÉRENCES .....	68

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Paramètres de structure de la tige.....	3
Figure 2 Mesure de la longueur d'un arbre : cas d'un arbre penché .....	7
Figure 3 Formes du tronçon .....	9
Figure 4 Principe du temps de parcours .....	10
Figure 5 Mesure lidar basée sur le temps de parcours du signal .....	12
Figure 6 (a) phase du signal transmis et réfléchi (b) comparaison de la phase entre le signal transmis et réfléchi au laser .....	13
Figure 7 Classification des lidars selon leurs mécanismes de balayage et leur couverture .....	14
Figure 8 Localisation de la zone d'étude au Canada.....	19
Figure 9 Placettes d'étude au Canada.....	19
Figure 10 Localisation de la zone d'étude en Allemagne.....	20
Figure 11 Placettes d'étude en Allemagne .....	21
Figure 12 ILRIS-3D d'optech (à gauche) et LMS-Z360 de RIEGL (à droite).....	22
Figure 13 Organigramme méthodologique .....	26
Figure 14 Prise de mesure concentrique .....	27
Figure 15 Scans verticaux.....	28
Figure 16 Acquisition des données de validation .....	29
Figure 17 (a) Scans des quatre stations vus du haut (b) Scans alignés et sélection de la placette (zone grisée) et (c) vue de la placette par les quatre stations.....	31
Figure 18 Sélection de points .....	34
Figure 19 Arbre 1 - placette 195.....	35
Figure 20 Distribution des erreurs d'estimation de la hauteur .....	38
Figure 21 Hauteurs des données lidar vs données de validation .....	38
Figure 22 Distribution des erreurs d'estimation du DHP .....	40
Figure 23 DHP des données lidar vs données de validation.....	41
Figure 24 Surface terrière des données lidar vs données de validation.....	43
Figure 25 Exemples de défilements typiques .....	45
Figure 26 Exemples de défilements problématiques .....	48
Figure 27 Erreur diamétrale moyenne : comparaison entre les deux logiciels .....	49
Figure 28 Erreur diamétrale moyenne : comparaison entre les peuplements .....	50
Figure 29 Comparaison du volume entre R-Routine et Autostem (en m <sup>3</sup> ).....	52
Figure 30 Branche 1 : rouge .....	53



Figure 31 Branche 2 : bleue.....	54
Figure 32 Branche 3 : jaune.....	54
Figure 33 Branche 4 : rose .....	55
Figure 34 Branche 5 : orange.....	55
Figure 35 Difficulté d'assemblage .....	61
Figure 36 Impact du ruban métallique.....	65

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 Estimation du volume par quatre formules de cubage.....	9
Tableau 2 Résumé sur les types de lidars terrestre .....	15
Tableau 3 Synthèse des placettes d'étude.....	21
Tableau 4 Caractéristiques de l'ILRIS-3D d'Optech et du LMS-Z360 de RIEGL .....	23
Tableau 5 Hauteur des arbres (m) .....	37
Tableau 6 DHP (cm).....	39
Tableau 7 Surface terrière (m <sup>2</sup> ).....	42
Tableau 8 DHP (en cm) comparés par 4 méthodes.....	44
Tableau 9 Volume des arbres en m <sup>3</sup> .....	51

## GLOSSAIRE

AMFE	Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
Lidar	<i>Light detection and ranging</i>
MNA	Modèle numérique d'altitude
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
RNCan	Ressources naturelles Canada
UAF	Unité d'aménagement forestier
OIFQ	Ordre des ingénieurs forestiers du Québec

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de maîtrise, M. Richard Fournier du Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke, pour la confiance qu'il a eue en moi, ainsi que pour ses judicieux conseils, son support constant tout au long de la réalisation de mon projet et son soutien financier.

Je tiens également à remercier M. Chhun-Huor Ung du Service canadien des forêts – Ressources naturelles Canada, pour son soutien technique et financier lors des inventaires sur le terrain. Merci à son équipe de techniciens forestiers composée d'André Beaumont, Jean-Pierre Bérubé, Sébastien Dagnault et Roger Gagné avec qui j'ai eu la chance de faire la collecte de mes données en Gaspésie, de même que Julien Blanchard, stagiaire à l'été 2008.

Je remercie M. Guy Côté de MCG3D pour son soutien technique avec l'utilisation du logiciel PointStream que j'ai utilisé tout au long de mes travaux. Je remercie également M. Enda Keane et M. Garret Mulloly de la compagnie Treemetrics en Irlande, ainsi que M. Hans Pretzsch, M. Hans-Joachim Klemmt et M. Stefan Seifert de la Chair of Forest Yield Science à la Technische Universität München en Allemagne pour m'avoir accueilli en stage en 2009. Leur intérêt marqué pour mon projet m'a permis de grandement bonifier les analyses et les résultats obtenus.

Je remercie le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) pour le soutien financier qui a permis la réalisation de mon projet.

Finalement, je remercie le département de géomatique appliquée pour le milieu de travail stimulant des dernières années qui n'aurait pas été le même sans mes collègues étudiants, les professeurs et les professionnels de recherches qui ont toujours été là. Je les remercie pour leur expertise, leurs encouragements et leurs nombreux conseils. Un merci spécial à ma famille et mes amis Sophie, Martin, Marie-Claude et Raphaël qui ont toujours cru en moi, particulièrement pour leur support et leur écoute lorsque j'en avais le plus besoin.

## 1. INTRODUCTION

Les forêts constituent des écosystèmes complexes, abritant à la fois un grand nombre d'espèces animales et végétales, et remplissant de multiples fonctions essentielles à l'équilibre naturel de notre environnement. Parmi celles-ci, on retrouve l'absorption du gaz carbonique et la libération d'oxygène, le maintien du sol par les racines, ainsi que la diminution du ruissellement. De plus, les forêts représentent une ressource naturelle de grande valeur pour la production de bois. Au Québec seulement, c'est plus de 360 000 km<sup>2</sup> des terres de l'État qui sont affectées à la production forestière, et 66 000 km<sup>2</sup> en tenure privée (Parent et Fortin, 2007). Vue l'étendue de ces superficies, il importe de bien connaître la ressource en présence afin d'en assurer une gestion adaptée. À cet égard, des inventaires forestiers sont réalisés afin d'évaluer le volume de bois, en plus de fournir un aperçu de la répartition de la matière ligneuse et d'assurer un équilibre entre les prélèvements et le renouvellement de la forêt (OIFQ, 2009, p.571).

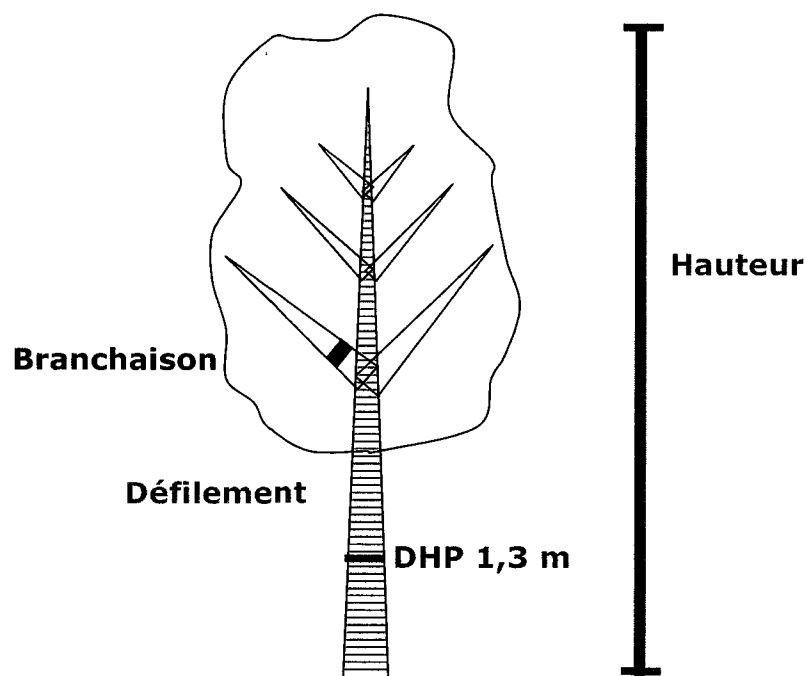
Plus précisément, les inventaires forestiers permettent de répondre à un besoin d'acquisition et de diffusion des connaissances des forêts (superficie, âge, volume de bois); de cartographie des écosystèmes forestiers (cartes écoforestières : description des peuplements et du milieu, perturbations, interventions); de planification des activités d'aménagement; et de soutien pour les orientations gouvernementales en matière d'aménagement durable des forêts (MRNF, 2008b). Au Québec, le territoire est divisé en unités appelées « unité de sondage », qui sont inventoriées sur une période d'un peu plus de trois ans. Les étapes d'un inventaire traditionnel sont la prise de photographies aériennes, la photo-interprétation et la cartographie, les levées de terrain et la compilation des données. La prise de photographies aériennes est généralement sur film avec une émulsion infrarouge fausses-couleurs, à l'échelle 1 :15 000, facilitant ainsi la reconnaissance des essences forestières. Suite à l'acquisition, les photographies sont étudiées en trois dimensions. Alors qu'elles étaient traditionnellement analysées à l'aide de stéréoscopes, l'ordinateur est maintenant l'outil privilégié afin de délimiter les contours des peuplements, de caractériser le milieu et d'en déterminer les types écologiques. Cette analyse mène à la réalisation de cartes écoforestières nationales qui sont mises à jour à chaque inventaire. Bref, une importante quantité d'informations est recueillie à partir des photographies, et à cela s'ajoutent les levées de terrain qui viennent compléter l'analyse quant aux caractéristiques dendrométriques des strates. En fait, la photo-interprétation présente des limites, entre autres, lors de l'évaluation des volumes de bois sur pied, l'âge, la qualité et la productivité

des peuplements. Ainsi, les levées de terrain représentent une source essentielle d'informations sur les peuplements forestiers.

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des photographies aériennes à l'échelle provinciale et nationale a bonifié les inventaires forestiers, répondant du même coup à un besoin grandissant d'uniformité de l'information (RNCAN, 2007). Bien que la photo-interprétation occupe une place prépondérante, la superficie du Canada s'avère une limite majeure à celle-ci. Ainsi, l'avènement des images satellites a contribué à palier à cette contrainte par le développement d'algorithmes de classification généralisés sur le territoire canadien et permettant ainsi la réalisation de cartes uniformisées à l'échelle nationale (RNCAN, 2007). Dans le but d'obtenir de l'information plus détaillée sur certains sites d'intérêt, l'utilisation de capteurs à haute résolution, tel le lidar (light detection and ranging) aéroporté, permet la reconstruction de la structure de la canopée et de la surface de terrain (Hollaus *et al.*, 2007). Cependant, afin de déterminer les paramètres quantitatifs tels le volume de bois ou la biomasse, qui ne peuvent être évalués avec un capteur aéroporté seul, il s'avère nécessaire de combiner ces données à des levées de terrain (Hollaus *et al.*, 2007). Ces levées de terrain peuvent cependant être limitées par des contraintes financières, humaines ou de temps, lorsqu'il s'agit de couvrir d'importantes superficies, parfois difficiles d'accès, et demandant un lot de mesures considérable en fonction des paramètres recherchés. Lors des prises de décisions relatives à la récolte et la transformation du bois, ce manque d'informations peut mener à des décisions non optimales et ne répondant pas aux besoins en question (Ung, 2008). À cet égard, le défi actuel consiste à enrichir les inventaires forestiers au sol quant aux paramètres de la structure de la tige et de les coupler avec l'information provenant de capteurs aéroportés ou satellitaires, afin d'obtenir une information la plus complète qu'il soit sur les peuplements forestiers.

Les paramètres tels la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), le défilement, le volume et le diamètre des branches font partie inhérente de la structure de la tige pour lesquels de l'information plus détaillée et plus précise est recherchée (Ung, 2008). La *hauteur* représente la distance verticale entre le pied et la cime de l'arbre (Figure 1) ; le *DHP*, un des paramètres les plus utilisés en foresterie, est le diamètre d'un arbre mesuré à une hauteur de 1,30 m au-dessus du sol; le *défilement* est la diminution de la grosseur de la tige d'un arbre, du bas vers le haut; alors que le *diamètre des branches* représente un paramètre de la qualité du bois, permettant d'évaluer la nodosité de celui-ci. De ces paramètres peut être évalué le *volume brut total (en m<sup>3</sup>)*, défini comme étant le volume de la tige principale avec son écorce, y compris la souche et le fin bout de la tige. En

dendrométrie, l'évaluation de ces paramètres est utilisée afin de déterminer l'accroissement et l'âge des arbres et des peuplements, ainsi que les dimensions et la forme des arbres et de leurs produits (bois ronds et bois débités) (Mimizan, 2009). Ces paramètres de structure sont également essentiels au développement de relations allométriques, telles la relation entre l'accroissement de la biomasse et l'accroissement en hauteur et en diamètre (Korol *et al.*, 1995 ; Monserud and Marshall, 1999), ainsi que la relation entre la taille des arbres et la densité des peuplements qui est abondamment utilisée pour la planification sylvicole (Innes *et al.*, 2005). L'usage opérationnel des relations allométriques témoigne de l'importance d'obtenir une information précise et détaillée sur la structure de la tige qui est à la base même de l'évaluation de nombreux paramètres essentiels.



**Figure 1 Paramètres de structure de la tige**

Bien que les capteurs aéroportés et satellitaires apportent une multitude d'informations sur les peuplements forestiers, les paramètres relatifs à la structure de la tige mentionnés précédemment, hormis la hauteur, ne peuvent être évalués adéquatement avec une vue aérienne. Afin de contourner cette difficulté et de palier au manque de données précises,

plusieurs études proposent l'utilisation du lidar imageur terrestre en milieu forestier pour l'évaluation de la structure de la tige (Hopkinson *et al.*, 2004 ; Pfeifer et Winterhalder, 2004 ; Thies and Spiecker, 2004 ; Bienert *et al.*, 2006 ; Burridge *et al.*, 2008 et Klemmt and Tauber, 2008 pour ne citer que ceux-ci). L'intérêt du lidar terrestre réside entre autres dans l'acquisition des données à un coût relativement abordable et rapide comparativement aux mesures traditionnelles, à la représentation en trois dimensions des peuplements et aussi à son potentiel cartographique. Ce dernier point représente un intérêt majeur dans le cadre d'inventaires forestiers pour le couplage d'informations avec d'autres sources, en particulier pour la photographie aérienne, la donnée lidar aéroportée et les images satellites à très haute résolution spatiale (Burridge *et al.*, 2008). En fait, les images prises au-dessus du peuplement couvrent généralement de grandes superficies, et peuvent être utilisées afin de délimiter les peuplements. Ces peuplements pourront faire l'objet d'inventaire avec un lidar terrestre, afin de coupler l'information et de la généraliser sur une plus grande étendue. À cet égard, l'évaluation des paramètres de structure de la tige à l'aide du lidar terrestre s'est avérée prometteuse dans des milieux homogènes telles les plantations, où la distribution spatiale s'avère relativement simple comparativement aux peuplements naturels (Hopkinson *et al.*, 2004), ainsi que dans des peuplements matures avec un sous-bois éclairci (Bienert *et al.*, 2006 et Thies and Spiecker, 2004). Toutefois, l'utilisation du lidar terrestre dans des peuplements mixtes hétérogènes demeure peu documentée. Ainsi, dans le cadre de ce projet, l'objectif principal vise donc à explorer le potentiel du lidar terrestre pour la mesure de paramètres de structure de tige en milieu hétérogène, milieu fréquemment rencontré au Québec, mais où l'utilisation du lidar a peu été expérimentée.

## **2. CADRE THÉORIQUE**

Cette section présente les mesures traditionnelles de paramètres de structure de la tige, une revue de la littérature de divers travaux de recherche menés sur l'utilisation du lidar terrestre pour l'inventaire de paramètres en milieu forestier, ainsi que les objectifs et hypothèses du projet de recherche.

### **2.1 Mesures traditionnelles**

Parmi les paramètres de structures de la tige étudiés lors des inventaires, les trois principaux sont le DHP, la hauteur et le volume, et à cela peut également s'ajouter le diamètre à la base des branches pour évaluer la nodosité du bois. Les méthodes d'inventaire traditionnelles, de même que les erreurs associées sont présentées pour chacun d'eux.



### **2.1.1 Diamètre de la tige et des branches**

Le diamètre peut être mesuré à diverses hauteurs le long de la tige afin d'évaluer le défilement ou être mesuré le long des branches afin d'évaluer la nodosité du bois. Les deux instruments les plus couramment utilisés sont le compas forestier et le ruban forestier, alors que le compas électronique a fait son apparition au cours des dernières années (Binot *et al.*, 1995).

Le compas forestier, aussi appelé pied à coulisse, est un appareil muni d'un bras mobile glissant le long d'un bras fixe comprenant une règle graduée. Les compas convertissant directement les mesures en classes de diamètres sont appelés compas compensés. Comme le diamètre d'une tige n'est pas nécessairement circulaire, la valeur obtenue peut, ne pas représenter le diamètre passant par le centre géométrique de la section. Ainsi, en déplaçant le compas autour de l'arbre, des mesures différentes peuvent être obtenues. Il est conseillé de faire la moyenne géométrique  $\sqrt{(d_1 \times d_2)}$  entre le plus petit ( $d_1$ ) et le plus gros diamètre ( $d_2$ ) obtenu (OIFQ, 2009, p.589). Cependant, en raison des fortes variations que l'on peut trouver dans certaines figures convexes, l'utilisation de la moyenne arithmétique  $(d_1 + d_2)/2$  est également recommandée (Mattern, 1956).

Quant au ruban forestier, aussi appelé ruban diamétrique ou galon circonférenciel, il est gradué de sorte qu'on obtient directement la valeur du diamètre ( $d$ ) de la tige, en mesurant sa circonférence ( $c$ ), par l'équation  $c = \pi \times d$ . Le choix de l'instrument pour mesurer le diamètre repose sur la finalité recherchée des résultats. Alors que le compas forestier est principalement utilisé lors du dénombrement des tiges par classes de diamètres grâce à sa rapidité d'exécution, le ruban forestier est préféré lors du mesurage précis du diamètre et les calculs d'accroissement (OIFQ, 2009, p.592). Malgré sa précision supérieure à celle du compas, le ruban forestier n'est pas exempt d'erreur, et tend à surestimer le diamètre de l'arbre à moins de 1% (OIFQ, 2009, p.592). Cette surestimation est fonction de la circularité du diamètre, et est moindre avec le compas qu'avec le ruban forestier en présence d'un diamètre elliptique (Binot *et al.*, 1995).

Un troisième instrument, le compas électronique, a été développé afin de réduire le temps d'acquisition et d'entrée des données diamétrales. Cet instrument est composé de deux bras métalliques à angle de 60 degrés et d'un émetteur récepteur. Dans une étude portant sur la comparaison de la précision relative du compas forestier, du ruban forestier et du compas électronique, Binot *et al.* (1995) a démontré que, bien que les mesures de DHP acquises

avec les trois instruments différents, la différence est généralement négligeable et inférieure à 1 cm. L'avantage majeur du compas électronique réside dans la rapidité d'acquisition des données.

Malgré les précautions prises afin d'éviter les erreurs, des erreurs aléatoires et systématiques peuvent survenir. Les erreurs aléatoires pouvant provenir de l'opérateur sont une pression trop forte sur le bras du compas lors de la mesure du diamètre, une tension importante dans le ruban forestier ou une erreur de lecture. Une erreur systématique lors de la mesure du diamètre peut être occasionnée par l'inclinaison du compas ou du ruban, ce qui a pour effet de surestimer le diamètre.

### **2.1.2 Surface terrière**

La surface terrière d'un arbre individuel est représentée par la surface de la section d'un arbre à la hauteur du DHP (m<sup>2</sup>) (AMFE, 2010) et est donnée par l'équation suivante :

$$s = \Pi \times \left( \frac{dhp}{2} \right)^2 \quad (12)$$

où

$s$  est la surface terrière (m<sup>2</sup>)

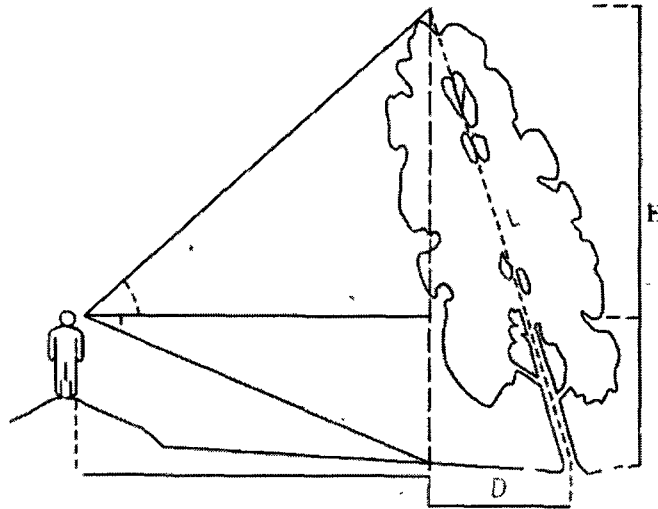
$dhp$  est le DHP exprimé en mètre (m)

Quant à la surface terrière totale d'un peuplement, il s'agit d'une mesure de densité qui s'exprime par la somme des surfaces terrières de tous les arbres pour une aire donnée. Cette mesure est exprimée en m<sup>2</sup>/ha (AMFE, 2010). La surface terrière est un paramètre important. En fait, une valeur élevée signifie généralement une compétition importante entre les arbres d'un peuplement pour avoir une quantité de lumière adéquate ainsi que des éléments nutritifs du sol. Ces facteurs influencent la croissance des tiges, et c'est pourquoi la surface terrière d'un peuplement est généralement prise en compte lors de travaux sylvicoles.

### **2.1.3 Hauteur**

La hauteur est le deuxième paramètre d'importance, après le diamètre, afin de déterminer le volume d'un arbre. La hauteur se définit comme étant la distance verticale entre le niveau le plus élevé du sol et l'extrémité de la plus haute pousse vivante ou morte de l'arbre. Il est à distinguer ici la hauteur (H) d'un arbre avec sa longueur (L), puisque la longueur représente la distance rectiligne entre le pied de l'arbre et l'extrémité de la dernière pousse vivante ou

morte (OIFQ, 2009, p.592) (Figure 2). Dans le cas d'un arbre parfaitement vertical, on obtient le même résultat pour la hauteur et la longueur.



**Figure 2 Mesure de la longueur d'un arbre : cas d'un arbre penché**

Tiré de Bégin (2006) *in* OIFQ (2009, p.592)

La hauteur des arbres peut être mesurée de façon directe ou indirecte. Dans le cas d'une prise de mesure directe, une tige télescopique ou un système de perches emboîtables peuvent être utilisés, et ce, lorsque les arbres ont une hauteur inférieure à 5 ou 6 m environ. Quant à la mesure indirecte de la hauteur, elle est réalisée à l'aide d'un clinomètre basé sur des principes trigonométriques. Ainsi, en mesurant l'angle de visé au sommet et au pied de l'arbre, et connaissant la distance entre l'arbre et l'opérateur, il est possible de déterminer la hauteur de l'arbre. Lorsqu'il s'agit de clinomètres électroniques, ceux-ci comprennent un télémètre permettant de déterminer la hauteur de l'arbre, sans avoir à mesurer la distance entre l'arbre et l'opérateur.

Les principales erreurs pouvant survenir lors de l'évaluation de la hauteur dans un peuplement dense sont liées à la difficulté de bien localiser le sommet de la tige, principalement pour les feuillus, et à l'évaluation de la distance entre l'arbre et l'opérateur, principalement en pente, ce qui a pour effet de surestimer la hauteur. La précision obtenue est généralement de l'ordre du mètre.

### 2.1.4 Volume

Selon le but de l'inventaire, la définition de volume peut être différente. Avec ou sans écorce, les parties de l'arbre à considérer, le diamètre minimal considéré, etc. Une méthode pour évaluer le volume d'un arbre consiste à diviser la tige en tronçons, d'estimer le volume de ces parties à partir de formes géométriques et d'en faire la somme. Diverses formules peuvent être utilisées. Notons entre autres :

$$\text{Formule de Smalian} \quad V = \frac{\Pi}{4} \left[ \frac{D_1^2 + D_2^2}{2} \right] L \quad (1)$$

$$\text{Formule de Hubert} \quad V = \frac{\Pi}{4} D_m^2 L \quad (2)$$

$$\text{Formule du tronc de cône} \quad V = \frac{\Pi}{12} (D_1^2 + D_2^2 + D_1 D_2) L \quad (3)$$

$$\text{Formule de Newton} \quad V = \frac{\Pi}{24} (D_1^2 + 4D_m^2 + D_2^2) L \quad (4)$$

où

$V$  est le volume (cm<sup>3</sup>)

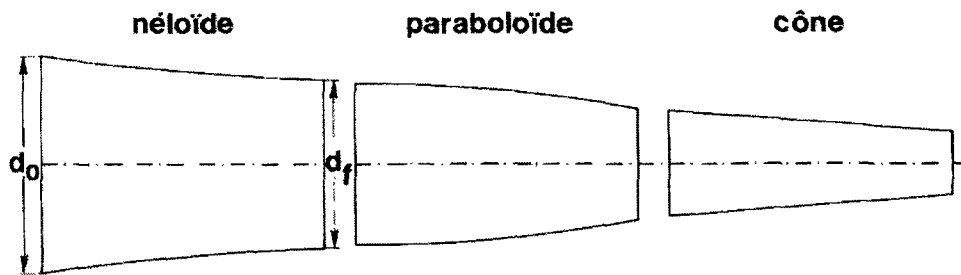
$D_1$  est le diamètre au gros bout (cm)

$D_2$  est le diamètre au fin bout (cm)

$D_m$  est le diamètre au milieu du tronçon (cm)

$L$  est la longueur d'un tronçon (cm)

Bien que la formule de Newton (4) puisse s'avérer plus précise en raison des trois mesures de diamètres utilisées, ce sont généralement les trois premières formules qui sont généralement utilisées, soit celle de Smalian (1), Hubert (2) et du tronc de cône (3), puisqu'elles nécessitent moins de paramètres d'entrée (OIFQ, 2009, p.599). Selon la forme du tronçon (Figure 3), on peut s'attendre à une sous-estimation, une surestimation ou un résultat exact de l'évaluation du volume de bois.



**Figure 3 Formes du tronçon**

tiré de Rondeux, 1993, p.73

Le Tableau 1 présente ces estimations pour chacune des quatre équations. Quant à la précision, elle dépend principalement de la longueur des tronçons ( $L$ ) considéré plutôt que de la formule utilisée (Rondeux, 1993, p.78). Plus la longueur d'un tronçon est petite, meilleure est la précision obtenue.

**Tableau 1 Estimation du volume par quatre formules de cubage**

Forme du tronç	Hubert	Smalian	Tronc de cône	Newton
Cylindre	=	=	=	=
Parabolioïde	=	=	-	=
Cône	-	+	=	=
Néloïde	-	+	+	=

Le volume réel est : exact (=), sous-estimé (-), surestimé (+)

adapté de Rondeux, 1993, p.78

## 2.2 Lidar terrestre

Les lidars sont des systèmes permettant d'acquérir un volume de données 3D important, avec une précision sans précédent. L'invention des lasers date du début des années 1960, mais ce n'est qu'avec le développement de la technologie informatique des années 1990 que les connaissances en laser ont connu un réel avancement (Shan et Toth, 2009, p.2). Dès l'invention du laser, des géomètres-experts et ingénieurs civils ont commencé à l'utiliser pour diverses applications. Parmi celles-ci, notons les opérations d'alignement et de mesure de déformation lors de la construction de ponts et tunnels. Les premières mesures réalisées utilisaient des appareils basés sur la différence de phase ainsi que sur la mesure du temps de parcours. D'abord dans le domaine militaire pour diverses applications, ce n'est qu'à partir des années 1970 que les lasers ont remplacés peu à peu les lampes de tungstène et de mercure utilisées pour les mesures de distances dans le cadre de travaux géodésiques

(Shan et Toth, 2009, p.2). S'ensuit la mise en place de stations totales pour la construction de cartes topographiques et de modèle de terrain. Dans le cas des lasers au sol, la distance mesurée varie entre quelques mètres et quelques centaines de mètres, alors que dans le cas des lasers aéroportés, cette distance est de l'ordre de centaines de mètres à plusieurs kilomètres (Lichti *et al.*, 2002). Deux principaux lidars ont été développés au fil des ans, et sont désormais disponibles sur le marché. Il s'agit du lidar basé sur le principe du temps de parcours du signal et celui sur la mesure de la différence de phase.

### 2.2.1 Mesure du signal

Le principe du lidar basé sur le temps de parcours du signal ainsi que celui sur la mesure de la différence de phase sont présentés ici.

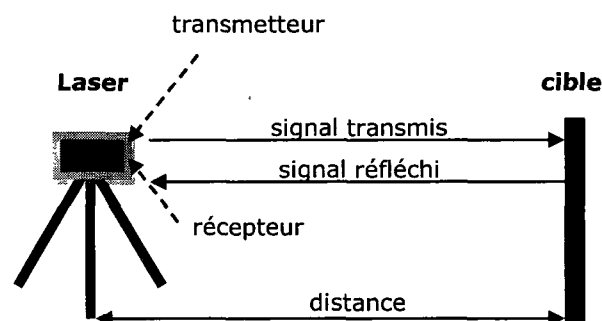
#### 2.2.1.1 Temps de parcours du signal

La méthode de la mesure du temps de parcours se base sur la durée de propagation du signal aller-retour entre le laser et la cible (Figure 4). Elle est la technologie lidar la plus utilisée et la plus répandue (Riegl, Optech, Trimble, Leica), puisqu'elle offre l'avantage de permettre la mesure d'objets situés à plusieurs centaines de mètres (Fröhlich and Mettenleiter, 2004). La distance d'un objet, par rapport au capteur, est calculée selon l'équation suivante:

$$D = v \cdot t / 2 \quad (5)$$

où

D est la distance de la cible (m)  
 v est la vitesse de la lumière (m/s)  
 t est le temps de parcours (s)



**Figure 4 Principe du temps de parcours**

De cette équation peut être dérivée la précision

$$\Delta D = \Delta v \cdot t/2 + v \cdot \Delta t/2 \quad (6)$$

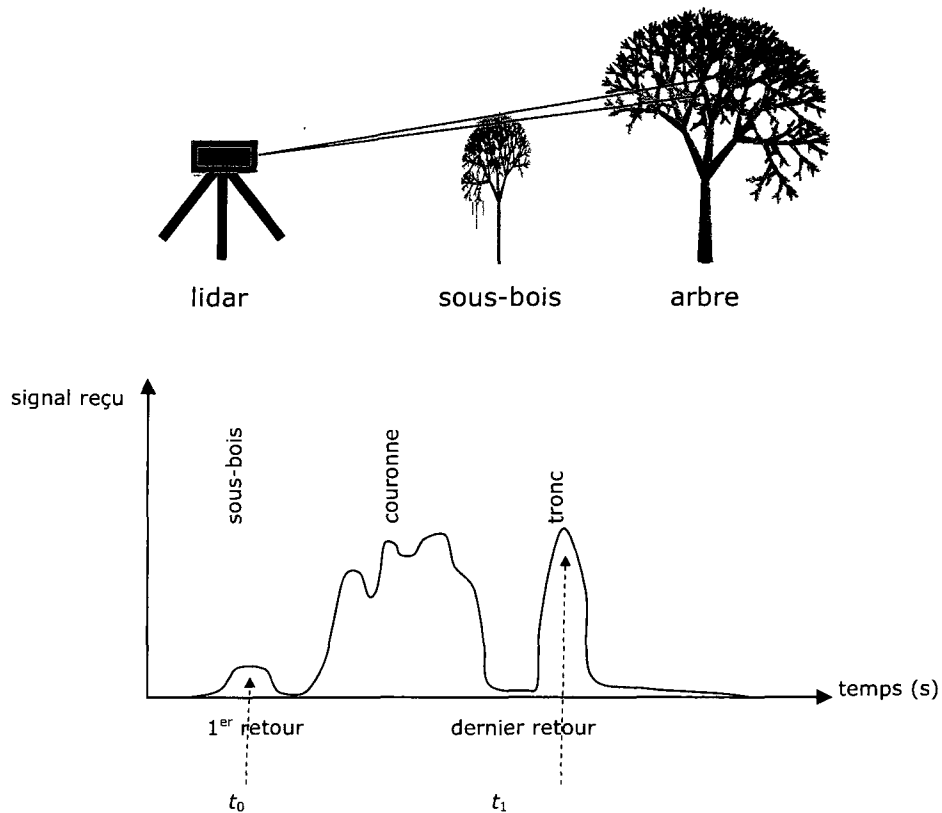
où

$\Delta D$  est la précision sur la distance (m)  
 $\Delta v$  est la précision sur la vitesse (m/s)  
 $\Delta t$  est la précision sur la mesure du temps (s)

Comme la vitesse de la lumière est bien connue, la précision sur la distance est généralement déterminée par la précision sur la mesure du temps de parcours (Shan et Toth, 2009, p.5).

Le lidar émet une impulsion lumineuse se propageant dans l'espace et interagissant avec les éléments rencontrés. En se propageant dans l'air, le phénomène de dispersion a pour effet d'augmenter le diamètre du rayon de l'onde émise. Ainsi, lors du contact avec les différentes composantes de la surface, l'onde est réfléchi à des temps différents, résultant en un signal de retours multiples. En fait, le faisceau lidar a une divergence naturelle, faisant en sorte d'illuminer la cible d'une surface circulaire ou elliptique. Pour un même appareil, plus la distance séparant l'appareil de la cible est grande, plus la surface mesurée à la cible est importante (Lichti et al., 2002).

En raison des nombreux retours possibles, certains modèles de lidar offrent la possibilité de mesurer un signal, généralement le premier ou le dernier retour, voir même de multiple retours. La mesure du premier retour correspond à la distance du premier objet rencontré, alors que la mesure du dernier retour correspond à la distance du dernier objet à avoir été atteint par le faisceau lumineux, et ce, en fonction de la capacité de pénétration de celui-ci et la sensibilité de l'instrument (Optech, 2008). Dans le cas qui nous intéresse ici, le premier retour pourrait par exemple mesurer le signal provenant d'une feuille, alors qu'avec le dernier retour, il pourrait s'agir du tronc (Figure 5).



**Figure 5 Mesure lidar basée sur le temps de parcours du signal**

inspiré de Shan et Toth, 2009, p.17

#### 2.2.1.2 Différence de phase

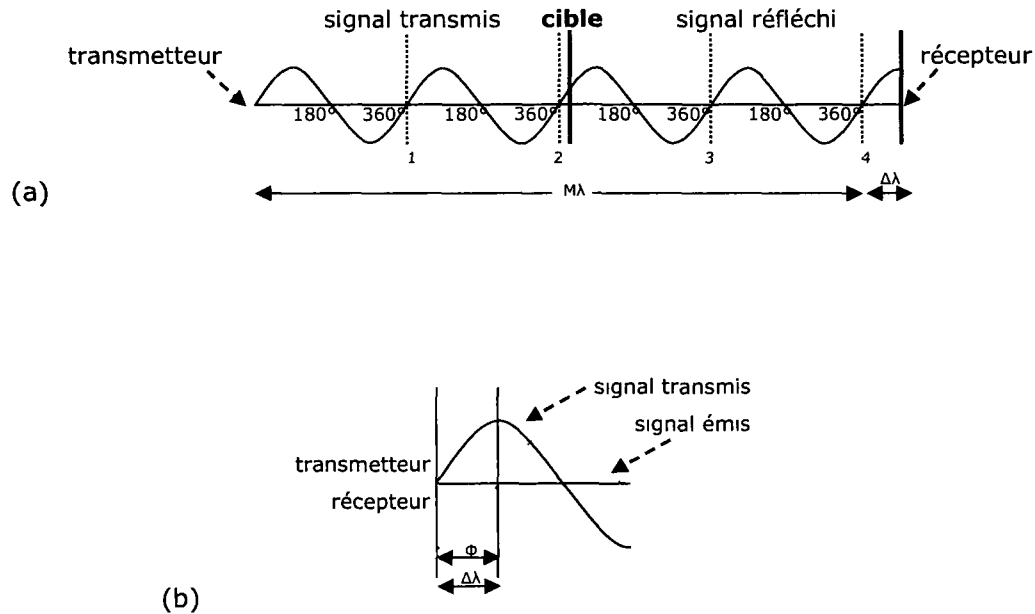
Dans le cas de la méthode basée sur la différence de phase, un faisceau est envoyé en continu (Figure 6), plutôt qu'une impulsion comme dans le cas précédent. En comparant l'onde sinusoïdale envoyée et reçue du faisceau envoyé, la distance peut être évaluée en mesurant la différence de phase d'après l'équation suivante :

$$D = (M\lambda + \Delta\lambda) / 2 \quad (7)$$

où

- D est la distance de la cible (m)
- M est le nombre entier de longueurs d'onde
- $\lambda$  est la valeur connue de la longueur d'onde (m)
- $\Delta\lambda$  est la partie fractale de la longueur d'onde, soit  $\phi/2\pi \cdot \lambda$ , où  $\phi$  est l'angle de phase





**Figure 6 (a) phase du signal transmis et réfléchi (b) comparaison de la phase entre le signal transmis et réfléchi au laser**

adapté de Shan et Toth, 2009, p.5

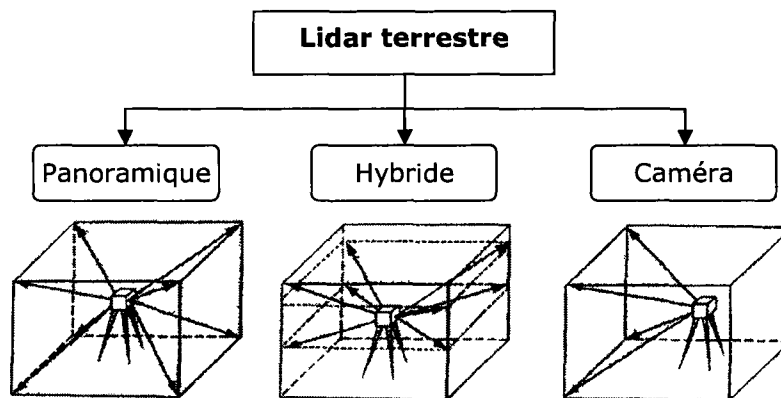
Selon le modèle de l'appareil (Zoller+Fröhlich, IQSun, VisImage), la méthode basée sur la différence de phase permet d'obtenir des mesures d'un haut niveau de précision, voir jusqu'à quelques millimètres, pour une distance de cibles de l'ordre de quelques dizaines de mètres (Fröhlich and Mettenleither, 2004). De plus, ces systèmes offrent généralement une vitesse d'acquisition de données grandement supérieure à celle des systèmes basés sur le temps de parcours du signal. À titre d'exemple, l'IMAGER 5003 de Z+F acquiert jusqu'à 625 000 points par secondes, le IQSun 240 000 et le VisImage 150 000 (Fröhlich and Mettenleither, 2004).

### **2.2.2 Classifications des lidars**

Outre la classification regroupant les lidars selon la méthode basée sur la mesure du signal (temps de parcours ou différence de phase), les lidars peuvent être classés selon leurs mécanismes de balayage et leur couverture, soit panorama, hybride ou caméra, ou la distance de balayage, soit courte, moyenne ou longue.

La Figure 7 présente la classification des lidars en trois classes selon leur mécanisme de balayage et leur couverture : panoramique, hybride, caméra. Le modèle panoramique, fort

utile lorsque la vue d'un hémisphère est recherchée, permet une couverture de  $360^\circ$  dans le plan horizontal et un minimum de  $180^\circ$  dans le plan vertical. Ce modèle est particulièrement bien adapté à des scènes comprises dans une pièce ou en forêt. Le modèle hybride, tout comme le modèle panorama, a un angle de vue de  $360^\circ$  horizontal. Cependant, dans le plan vertical, celui-ci est limité à un angle de vue généralement compris entre  $50^\circ$  et  $60^\circ$ . Ce type d'appareil est principalement utilisé lorsque les objets ne se situent pas à des angles verticaux très élevés. Quant au type caméra, il est généralement limité à un champ de vision de  $40^\circ \times 40^\circ$ . Ce type de modèle est adapté à la mesure d'objets spécifiques qui peuvent être observés d'un ou plusieurs points de vue (pont, tour, édifice).



**Figure 7 Classification des lidars selon leurs mécanismes de balayage et leur couverture**

adapté de Shan et Toth, 2009, p.91

La classification des lidars selon la distance de balayage peut se définir en trois catégories : courte, moyenne, longue. La première catégorie regroupe les lidars dont la distance est limitée à environ 100 m et comprend majoritairement les lidars basés sur la différence de phase. La catégorie moyenne, comprend les lidars presque entièrement basés sur le temps de parcours et permet un balayage allant jusqu'à 150, voir même 350 m. Quant à la troisième catégorie, soit les lidars à longue portée, elle est aussi principalement composée de lidars basés sur la méthode du temps de parcours, permettant un balayage jusqu'à un kilomètre ou plus qui, cependant, entraîne une diminution de précision de la mesure. Le Tableau 2 présente un résumé de la technologie lidar, le type de couverture ainsi que la précision en fonction des trois distances de balayage des lidars. Avec le nombre considérable de modèles

lidars sur le marché, il s'avère difficile de tracer un portrait global tenant compte de chaque spécificité des appareils. Il s'agit donc d'un tableau général à titre indicatif.

**Tableau 2 Résumé sur les types de lidars terrestre**

Distance de balayage	Technologie	Couverture	Précision
Courte inférieure 100 m	gén. différence de phase	panoramique	< 5 mm à 25 m
Moyenne 150 à 350 m	gén. temps de parcours	panoramique/hybride/caméra	< 10 mm à 100 m
Longue jusqu'à 1km	temps de parcours	caméra	< 20 mm à 100 m

### **2.2.3 Le lidar terrestre en foresterie**

L'engouement du lidar terrestre au cours de la dernière décennie a permis un avancement considérable dans le domaine de la foresterie, et ce, dans un but de bonifier les inventaires forestiers au sol. Les principaux paramètres étudiés ont trait à la hauteur, au DHP, au défilement ou au volume de bois, au diamètre des branches ainsi qu'à la position des tiges.

En 2004, les travaux d'Hopkinson *et al.* avaient pour but d'étudier le potentiel du lidar terrestre quant à ces paramètres hormis le diamètre des branches, et ce, en étudiant une plantation de pins rouges matures et un peuplement de feuillus mixte dominé par l'érable à sucre. Après avoir obtenu une modélisation en 3D des peuplements à partir de cinq prises de vue, les paramètres ont été évalués manuellement. Les premiers résultats obtenus étaient concluant : une légère sous-estimation systématique (environ 1,5 m) de la hauteur résultant de l'effet d'ombrage du couvert a été observée. Quant à la position, un léger décalage a été introduit lors de la fusion des scans, ce qui a produit un alignement imparfait. Sur les 138 arbres inventoriés manuellement, 134 ont pu être retrouvé sur les données lidars. Les résultats du DHP étaient également concluants, présentant une relation linéaire très près des données de validation terrain ( $r^2=0,85$ ). Finalement, l'estimation du volume de bois généré à partir d'équations allométriques est d'environ 7% du volume calculé manuellement pour la plantation, alors qu'il a fortement été surévalué dans le peuplement mixte. Bref, les travaux de recherches d'Hopkinson *et al.* (2004) ont ouvert la voie à d'autres travaux de recherche, dont l'évaluation automatique du défilement des tiges, en raison du processus manuel ayant nécessité un temps de traitement long et subjectif selon l'opérateur.

Afin d'accélérer le processus d'extraction des paramètres et d'obtenir des résultats non subjectifs, des algorithmes ont été développés pour déterminer les paramètres de structures. Aschoff et Spiecker (2004) ont mis en place une méthode semi-automatique

d'extraction des paramètres. Tout d'abord, un filtre est appliqué afin d'éliminer les points lidars aberrants enregistrés. Par la suite, un modèle numérique d'élévation est réalisé, suivi de la cartographie de la position des tiges représentées par des cercles ou des ellipses. En comparant les deux formes, ils sont ainsi arrivés à de meilleurs résultats quant à la moyenne arithmétique du DHP. Les résultats ont été obtenus sur un peuplement comprenant cinq scans et ayant nécessité environ trois heures de prise de mesure sur le terrain. Pfeifer et Winterhalder (2004), quant à eux, ont proposé une méthode de modélisation des tiges et des branches principales par une séquence de cylindres qui se superposent. Ils ont ainsi obtenu une reconstruction des tiges principales. Quant à la sélection des branches, elle a été faite de façon manuelle, puisque l'identification de celles-ci représente une difficulté plus importante. En fait, il faut d'abord identifier leur position et la direction vers laquelle elles sont orientées. De plus, en raison de la distance des branches avec le lidar, de l'angle de vue et de la taille des branches qui est généralement plus petite qu'un tronc d'arbre, une moins grande densité de points est obtenue avec le lidar terrestre, d'autant plus que l'occlusion s'avère importante plus on monte vers la cime de l'arbre. Néanmoins, tant pour les tiges que les branches, des défilements concluants ont été obtenus.

Thies *et al.* (2004) se sont posés la question à savoir si plusieurs scans étaient nécessaires ou si un seul scan suffisait à obtenir des résultats concluants. Ils ont alors proposé deux façons différentes de mesurer les placettes en milieu forestier, soit le mode unique, c'est-à-dire un seul scan pris du centre de la placette, ou le mode multi-scan, soit l'acquisition des données lidars de divers points de vue de la placette. Bien que le mode unique soit plus rapide, il est ressorti qu'en milieu forestier l'occlusion des arbres est inévitable. Ainsi, afin d'obtenir des résultats sur l'ensemble d'un peuplement et des arbres, il s'est avéré avantageux d'augmenter le nombre de prises de vue, et par conséquent, le temps d'acquisition, dans le but d'obtenir des données offrant une meilleure couverture du peuplement. En fait, la détection des tiges lors de l'étude de Thies *et al.* (2004) était de 22% d'erreur avec un scan unique, et de 52% d'erreur avec deux scans.

Une fois la meilleure stratégie de balayage de la placette déterminée, Bienert *et al.* (2006) ont développé un logiciel permettant la détection automatique des arbres, de leur hauteur ainsi que du DHP, et ce, afin de répondre au besoin grandissant d'automatisation pour l'extraction des paramètres de structures d'arbres. Deux scans ont été enregistrés pour un peuplement de 14 arbres lors de leur étude. De façon automatique, leur logiciel a permis

une détection de 95% des arbres. Les résultats pour le DHP et la hauteur sont respectivement de +/- 1,5cm et +/- 80 cm, et démontrent ainsi le potentiel d'extraction automatique des paramètres de structures d'arbres provenant de données de lidars terrestres.

## **2.3 Objectifs et hypothèses**

### **2.3.1 Objectifs**

Tel que présenté précédemment, des travaux de recherche portant sur l'utilisation du lidar terrestre en milieu forestier ont été menés sur des plantations ou des peuplements matures de conifères. Or, l'homogénéité des essences d'arbres ainsi que la distribution spatiale dans une plantation s'avèrent relativement simples comparativement aux peuplements naturels. Ainsi, l'objectif général de ce projet de maîtrise est d'étudier la capacité du lidar terrestre pour la mesure de paramètres relatifs aux tiges d'arbres dans divers types de peuplements, et plus particulièrement en milieux naturels hétérogènes. Les métriques ciblées dans le cadre de cette étude visent les paramètres reliés à la tige, soit la hauteur, le DHP, et le défilement de la tige, auxquels s'ajoute la mesure du diamètre à la base des grosses branches dans la portion inférieure du houppier.

Le projet est réalisé en collaboration avec des partenaires provenant de trois pays, soit le Canada, l'Irlande et l'Allemagne, venant ainsi enrichir la base de données analysée et mettre en commun l'expertise de chacun. Au total, des données provenant de cinq sites d'étude canadiens et deux sites allemands ont été traités avec le logiciel Autostem de la compagnie ©Treemetrics en Irlande et R-Routine de la Chair of Forest Yield Science en Allemagne. Les objectifs spécifiques sont : (1) de quantifier les erreurs de mesures de la hauteur de l'arbre, du DHP et du défilement de la tige obtenues par les logiciels de traitement des données provenant de lidars terrestres, en comparant ces mesures à celles traditionnelles sur le terrain; (2) d'évaluer le potentiel d'évaluation du diamètre des branches; (3) d'identifier les forces et les limites du lidar terrestre dans un contexte d'opérationnalité en milieu forestier; et (4) d'établir un protocole de prises de mesures en fonction des métriques recherchées.

### **2.3.2 Hypothèses**

L'hypothèse principale proposée est que le traitement de nuages de points provenant de données du lidar terrestre permet d'évaluer des métriques relatives à la structure de l'arbre en milieux naturels hétérogènes, tel que suggéré par Bienert *et al.* (2006). Les hypothèses

spécifiques sont que : (1) les métriques tels le DHP, la hauteur et le volume de la tige peuvent être mesurées à partir de données provenant de lidars terrestres pour des peuplements hétérogènes (Hopkinson *et al.*, 2004) ; (2) le défilement du tronc peut être mesuré avec une précision de l'ordre du centimètre (Pfeifer et Winterhalder, 2004) ; (3) le lidar terrestre présente un potentiel de développement de protocoles opérationnels en milieu forestier et d'automatisation (Klemmt et Tauber, 2008 ; Treemetrics, 2008).

### **3. MATÉRIEL**

Cette section présente les sites d'études, les deux types de lidars terrestres utilisés, les logiciels de prétraitement et de traitement des données ainsi que la méthodologie de réalisation.

#### **3.1 Sites d'étude**

Afin d'évaluer le potentiel du lidar et des logiciels de traitement des nuages de points, une variété de peuplements forestiers a été traitée : forêts de conifères, de feuillus et mixte, ainsi que des plantations. Au total, sept sites d'étude provenant de différentes régions ont été ciblés pour ce projet : cinq sites en Gaspésie (Québec, Canada) et deux sites à Selb en Allemagne. L'intérêt d'une telle diversité de sites est de permettre la comparaison entre différents peuplements forestiers évoluant dans différentes régions et, par conséquent, différentes conditions climatiques et intervention dans le milieu. Chacune des placettes est circulaire et occupe une superficie de 400 m<sup>2</sup>, soit un rayon de 11,28 m tel que défini pour les placettes d'échantillonnage du ministère des Ressources naturelle et de la Faune (MRNF).

Les cinq sites d'étude du Canada sont situés dans la réserve faunique de Matane en Gaspésie (Québec), à l'intérieur des limites de l'unité d'aménagement forestier (UAF) 012-54 (Figure 8). Ces placettes présentent une diversité quant au type de peuplements : deux sites de peuplement mixtes à dominance feuillus, un site mixte, un site de feuillus et un site de conifères (Figure 9). Afin d'observer la tige des arbres, la prise de données s'est déroulée avant le débourrage des feuilles, soit à la fin mai 2008.

## Localisation de la zone d'étude

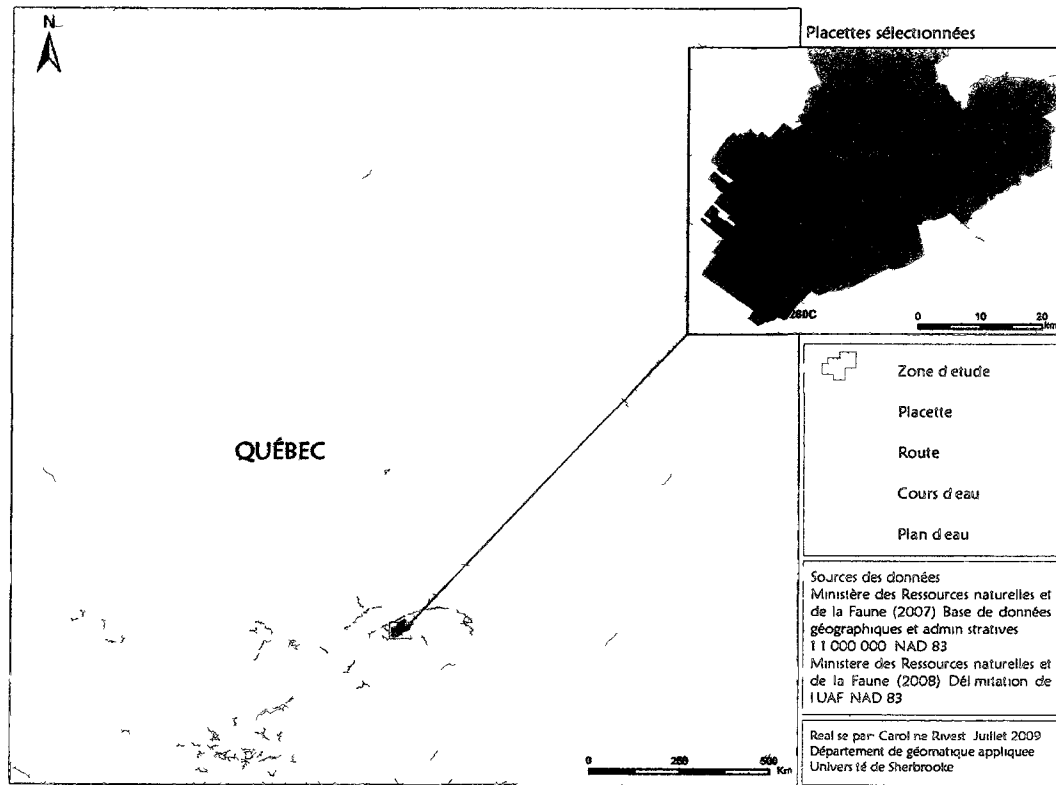


Figure 8 Localisation de la zone d'étude au Canada

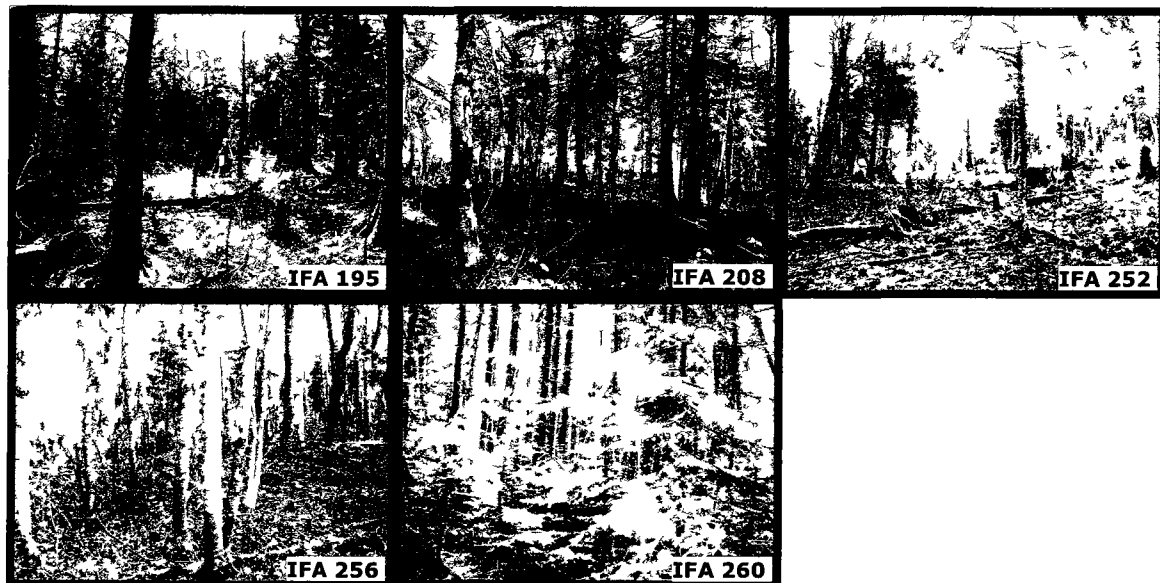
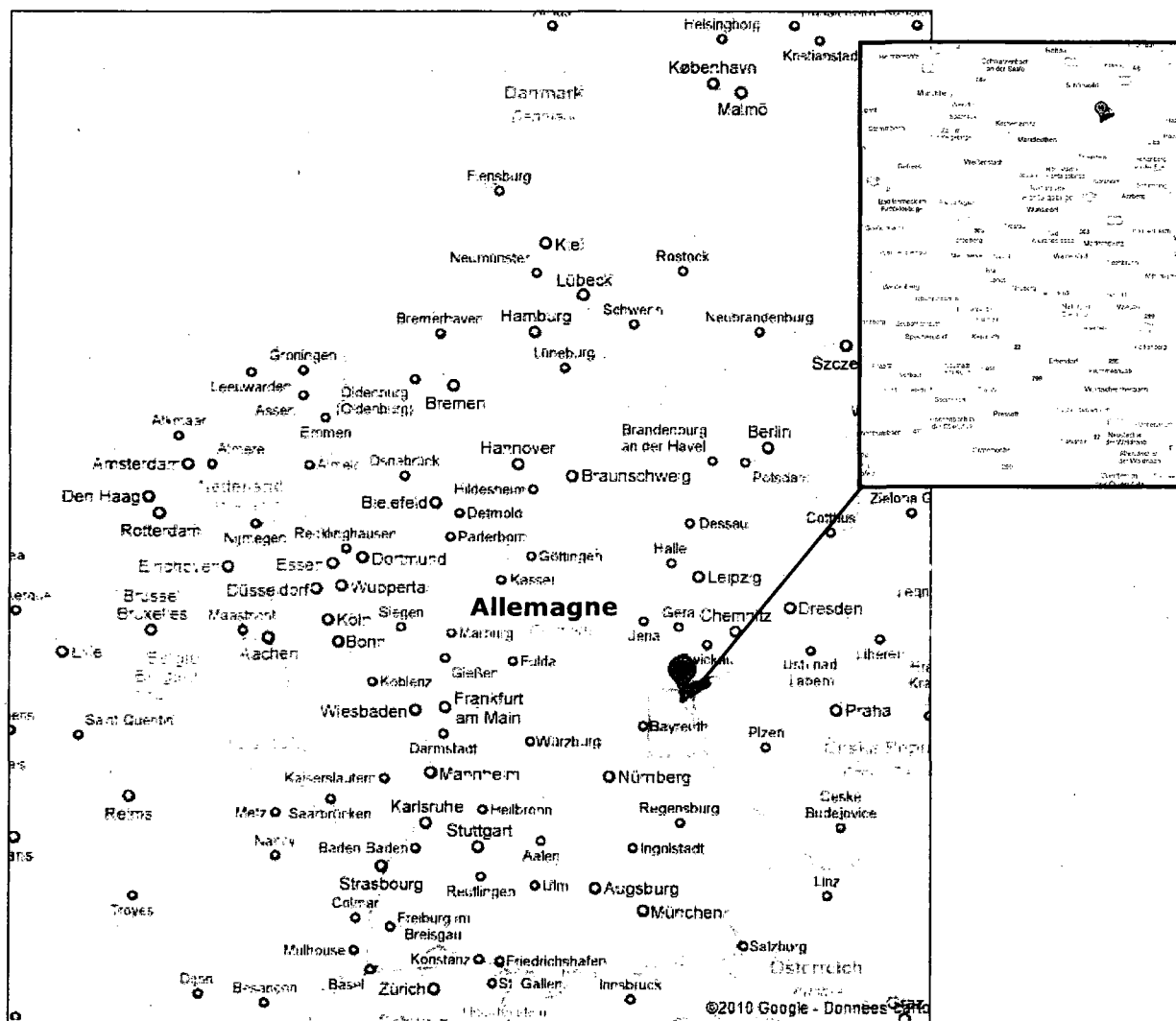


Figure 9 Placettes d'étude au Canada

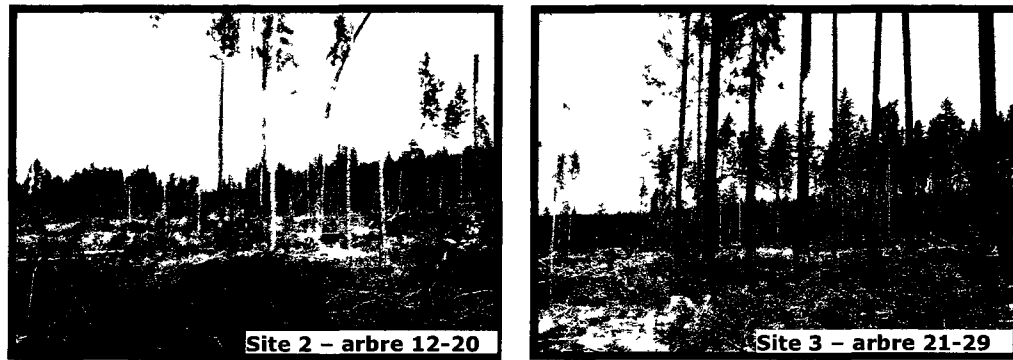
Les deux sites d'étude en Allemagne sont situés dans le Naturpark Fichtelgebirge à Selb, en Bavière, tout juste à la frontière avec la République Tchèque (Figure 10).



**Figure 10 Localisation de la zone d'étude en Allemagne**

Il s'agit de deux peuplements de conifères matures âgés entre 106-141 ans, composé majoritairement d'épinette de Norvège, et quelques pins sylvestre. L'absence de sous-bois et la faible proportion des branches permettent une bonne visibilité du tronc, tel qu'on peut l'observer à la Figure 11.





**Figure 11 Placettes d'étude en Allemagne**

Le Tableau 3 présente un résumé des sept placettes d'étude, soit le nombre d'arbres par placette, le type de peuplement et les arbres servant à la validation des résultats. Au plus cinq arbres par placette en Gaspésie ont été mesurés à des fins de validation, et ce, sans égard au nombre d'arbres dans le peuplement à l'étude

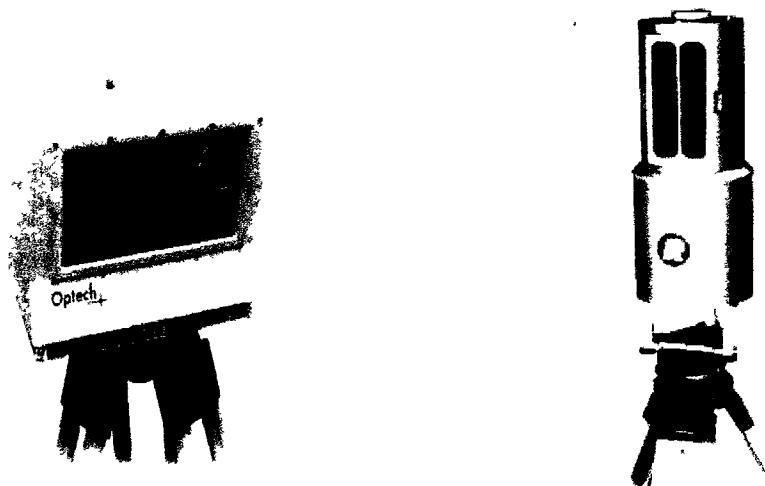
**Tableau 3 Synthèse des placettes d'étude**

Numéro de la placette	Type de peuplement	Nombre d'arbres		Pente degrés
		arbres F/C/T*	Validation F/C/T	
IFA 195	Mixte feuillus	20 / 11 / 31	2 / 2 / 4	8
IFA 208	Mixte	17 / 14 / 31	4 / 0 / 4	16
IFA 252	Mixte feuillus	28 / 10 / 38	4 / 1 / 5	15
IFA 256	Feuillus	117 / 1 / 118	4 / 0 / 4	10
IFA 260	Conifères	1 / 103 / 104	0 / 4 / 4	2
Site 2	Conifères	0 / 9 / 9	0 / 9 / 9	< 2
Site 3	Conifères	0 / 9 / 9	0 / 9 / 9	< 2

\* F : feuillu, C : conifère, T : Total

### 3.2 Lidars

Deux lidars terrestres ont été utilisés dans le cadre de ce projet, soit l'ILRIS-3D d'Optech et le LMS-Z360 de RIEGL (Figure 12). L'ILRIS-3D d'Optech a initialement été développé pour l'Agence spatiale canadienne à la fin des années 1990, et en 2000, une version adaptée pour trépied a été introduite sur le marché (Shan et Toth, 2009, p.105). L'ILRIS-3D est basé sur le principe du temps de parcours, est de type caméra (40°×40°) et à longue portée, soit jusqu'à un kilomètre. Quant au LMS-Z360 de RIEGL, il est également basé sur le temps de parcours et est à longue portée, mais est de type hybride, offrant ainsi un champ de vision supérieur, soit 90°×360°.



**Figure 12 ILRIS-3D d'optech (à gauche) et LMS-Z360 de RIEGL (à droite)**

Source : [www.optech.ca](http://www.optech.ca) et [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

Le Tableau 4 présente les principales caractéristiques des deux appareils. Un avantage majeur du LMS-Z360 de RIEGL est son champ de vision de  $90^{\circ} \times 360^{\circ}$ . Ainsi, deux scans sont nécessaires afin de balayer un hémisphère complet, alors que près d'une trentaine de scans sont nécessaires pour obtenir la même couverture avec l'ILRIS-3D d'Optech. D'autre part, le temps d'acquisition des données est de 3 à 7 fois plus rapide avec le LMS-Z360 de RIEGL. Les distances minimales des cibles est de 4 m dans le cas de l'ILRIS d'Optech et 2 m pour le LMS-Z360 de RIEGL. L'erreur de positionnement est plus petite pour l'ILRIS-3D, soit 8 mm, comparativement à 12 mm pour le LMS-Z360 de RIEGL dans le cas d'un scan unique. Quant au diamètre du faisceau laser, il est de 2 cm à 50 m pour l'ILRIS et le LMS-Z360. Ce diamètre est obtenu en fonction de la largeur du faisceau à la sortie et de la divergence de celui-ci. Dans le cas de l'ILRIS-3D, la largeur du faisceau à la sortie est de 12 mm. Connaissant la divergence qui est de 0,00017 rad ( $0,00974 \text{ degrés} \times \pi/180$ ), on obtient la largeur du faisceau de l'Iris-3D à une distance X (en m) donnée en fonction de l'équation 8 (Leblanc, 2010). Il en est de même pour le LMS-Z360. La largeur du faisceau de sortie étant évaluée à approximativement 0,018 m en fonction des autres paramètres fournis par RIEGL (équation 9).

$$\text{largeur du faisceau (en m) pour l'ILRIS-3D} = 0,012 + 0,00017 * X \quad (8)$$

$$\text{largeur du faisceau (en m) pour le LMS-Z360} = 0,018 + 0,000035 * X \quad (9)$$

où X est la distance entre l'appareil et la cible.

**Tableau 4 Caractéristiques de l'ILRIS-3D d'Optech et du LMS-Z360 de RIEGL**

<b>Système de mesures laser</b>	<b>ILRIS-3D d'Optech</b>	<b>LMS-Z360 de RIEGL</b>
Type	temps de parcours	temps de parcours
Champ de vision du scanner	40° x 40°	90° x 360°
Longueur d'onde	1550 nm	900 nm
Taux d'acquisition de données	2 500 pts/s	6000 - 18000 pts/s
Spectre laser	Visible	Visible
Distance minimale de la cible	4 m	2 m
Diamètre du faisceau laser	2 cm à 50 m	2 cm à 50 m
Divergence du faisceau	0,00974 degrés	0,002 degrés
Erreur de positionnement	8 mm à 100 m	6 mm (moyenne) 12 mm (scan unique)

### **3.3 Logiciels de prétraitement et traitement**

Deux logiciels de prétraitement des données ont été utilisés, soit PointStream 3D d'ImageSuite pour les données de l'Iris-3D d'Optech et RiSCAN PRO adapté aux données du LMS-Z360 de RIEGL, ainsi que deux logiciels de traitement des données conçus spécifiquement pour l'extraction de paramètres structuraux en milieux forestiers. Ces deux logiciels sont Autostem développé en Irlande, ainsi que R-Routine, développé en Allemagne.

#### **3.3.1 Prétraitement des données**

##### *3.3.1.1 PointStream 3D ImageSuite*

PointStream 3D ImageSuite est un logiciel qui permet l'édition et la visualisation de nuages de points, à partir de données en format .xyzrgb. L'édition comprend entre autres l'alignement et la fusion de scans multiples, le filtrage des données et la modification. Ce logiciel permet également la visualisation des données en 3D, la manipulation et d'extraction des sections du nuage de points (Arius 3D, 2009).

##### *3.3.1.2 RiSCAN PRO*

RiSCAN PRO est un logiciel développé par RIEGL pour les lasers 3D de la série LMS-Z, tel le LMS-Z360. RiSCAN PRO a été conçu en fonction de minimiser le temps d'acquisition en offrant un outil de visualisation des données et des points de contrôle directement sur le terrain (RIEGL, 2009). À partir de l'indentification de cibles, les scans peuvent directement être assemblés par le logiciel. Par la suite, des fonctions de traitement et d'édition des données sont disponibles.

### **3.3.2 Traitement des données**

#### **3.3.2.1 Autostem, Irlande**

Autostem, développé par la compagnie Treemetrics (Irlande), est un logiciel irlandais spécifiquement conçu afin de traiter les nuages de points provenant de lidars terrestres en milieux forestiers. Plus spécifiquement, il a été développé à la base pour traiter des données lidars provenant de plantations homogènes. Il permet de traiter un scan en format .xyz représentant l'ensemble d'une placette. Le temps de traitement dépend entre autres des composantes de l'ordinateur, de la taille du fichier et de la complexité du nuage de points, dont l'importance du sous-bois. Le logiciel offre une interface conviviale où des paramètres d'entrée tels le diamètre de la placette, la distance entre deux diamètres mesurés le long de la tige et le minimum de points considérés peuvent être déterminés. Avant l'analyse portant sur les arbres, un modèle numérique d'altitude (MNA) est d'abord généré par le logiciel. Par la suite, pour chaque arbre trouvé lors de l'analyse, le DHP, le diamètre au 0,1 m lorsque possible, la hauteur, le volume ainsi que de la position (x, y) sont évalués. Une fois le traitement complété, il est possible d'appliquer une interpolation de type *spline* ou linéaire afin d'extrapoler les diamètres manquant pour compléter le défilement.

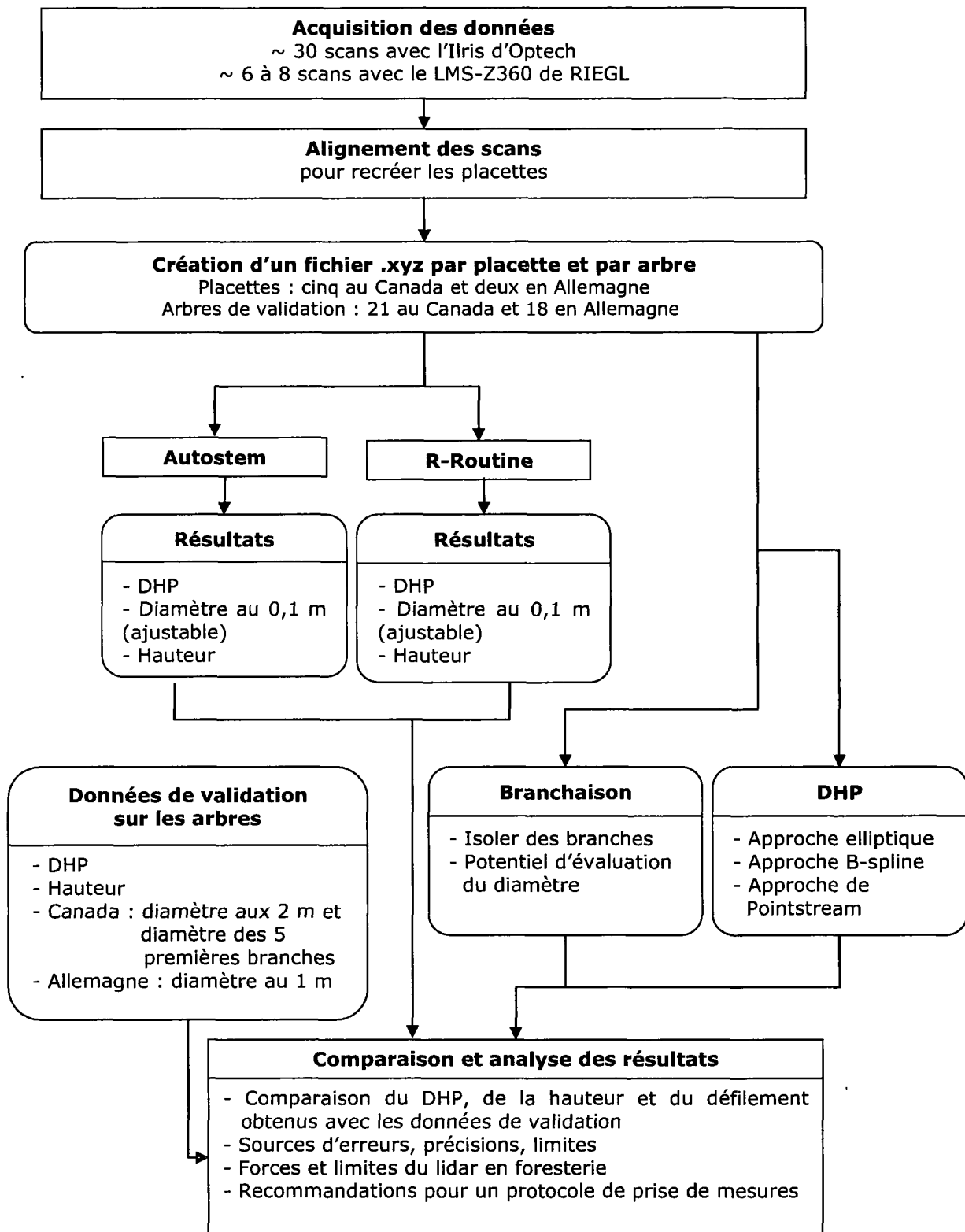
#### **3.3.2.2 R-Routine, Allemagne**

Le logiciel R-Routine a été développé par la Chair of Forest Yield Science de la Technische Universität München (Allemagne). Tout comme Autostem, le logiciel a été initialement conçu pour le traitement de conifères de taille importante (hauteur de 30 m et plus), et avec peu de branche dans la partie inférieure de la tige. Ce logiciel permet de traiter les nuages de points d'arbres individuels afin d'obtenir les paramètres de défilement, de hauteur et de volume. Ainsi, préalablement au traitement de nuages de points dans le logiciel R-Routine, un fichier .xyz doit être créé manuellement pour chaque arbre. Pour chacun des fichiers, le DHP, le diamètre au 0,1 m, la hauteur de l'arbre et le volume sont ensuite évalués. Une interpolation de type *spline* pour compléter le défilement, lorsque le diamètre n'a pu être évalué par le logiciel le long de la tige est ensuite appliquée. Bref, la différence principale avec Autostem est que R-Routine évalue les paramètres pour des fichiers d'arbres individuels, alors qu'Autostem traite une placette dans son ensemble et isole automatique les arbres.

## 4. MÉTHODOLOGIE

Une première zone d'étude est située dans la Réserve faunique de Matane, où des placettes d'inventaire sont délimitées et divers types de peuplements rencontrés. L'ILRIS-3D d'Optech, disponible à l'Université de Sherbrooke, a été choisi pour scanner les placettes d'étude. Quant aux sites d'étude en Allemagne, ils ont été scannés par la Chair of Forest Yield Science de la Technische Universität München en 2008 et un inventaire détaillé est disponible pour ces sites. L'appareil LMS-Z360 de RIEGL étant utilisé par le groupe de recherche allemand, ce même appareil a servi à scanner les peuplements de ces sites. Aucun des sites à l'étude n'a été scanné avec les deux appareils.

L'organigramme méthodologique (Figure 13) présente les principales étapes des traitements effectués, soit 1) l'acquisition 2) le prétraitement des données brutes, 3) le traitement des données à l'aide de deux logiciels et les extrants associés 4) l'évaluation du DHP et des branches, ainsi que 5) la comparaison des résultats avec comme intrants des données terrain, ainsi que l'analyse des résultats.



**Figure 13 Organigramme méthodologique**

## 4.1 Acquisition des données

En raison des protocoles de prise de mesures et des outils utilisés qui diffèrent, l'acquisition des données et le prétraitement des données brutes varient également quelque peu entre les sites d'étude du Canada et de l'Allemagne.

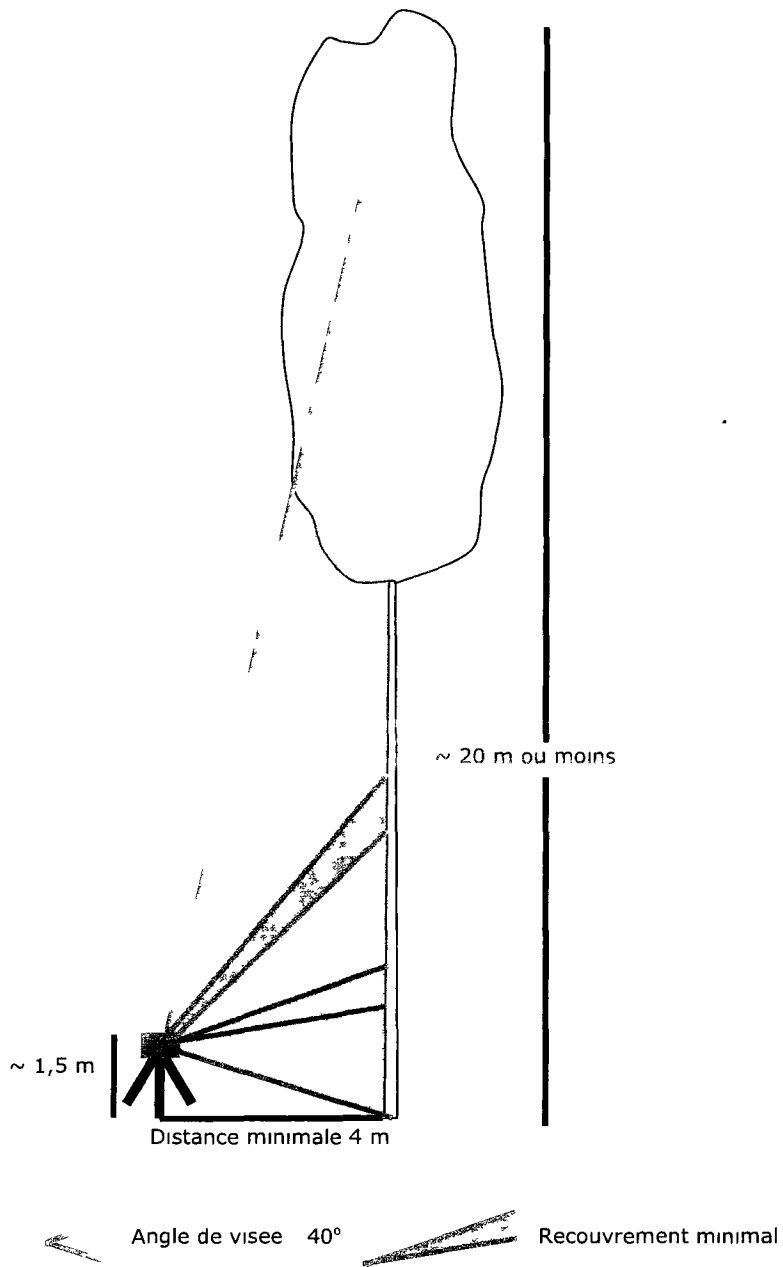
### 4.1.1 Canada

L'ILRIS-3D d'Optech a été utilisé pour l'acquisition des données lidars des cinq sites d'étude canadiens. Une densité de points d'échantillonnage de 15 mm à 15 m de l'appareil a été sélectionnée pour l'acquisition des données en mode dernier retour. Cela permet d'acquérir une image de  $40^\circ \times 40^\circ$  en 4,44 minutes. Les données ont été acquises entre le 20 mai et le 5 juin 2008, soit avant le débourrage des feuilles. Ainsi, le tronc et les branches étaient davantage visibles qu'en saison estivale. Quant aux données lidars, la stratégie d'échantillonnage consistait en une prise de mesures concentrique (Figure 14), soit en positionnant trois à quatre stations lidars en périphérie (1 à 5 m) de la placette d'étude.



**Figure 14 Prise de mesure concentrique**

L'ILRIS-3D ayant un angle de vue de  $40^\circ \times 40^\circ$ , entre 9 et 16 scans étaient nécessaires afin de balayer une placette par station, soit trois à quatre verticaux (Figure 15) et tout autant dans le plan horizontal. De ce fait, environ 30 scans ont été nécessaires afin de balayer une placette d'un minimum de trois stations. Une fiche terrain, présentée à l'Annexe 1, a été utilisée lors de la prise de mesures. Il importe de mesurer les angles verticaux et horizontaux pour chaque visée avec l'appareil, ainsi que la position des stations les unes par rapport aux autres afin de faciliter l'assemblage ultérieur des scans à l'aide du logiciel PointStream.

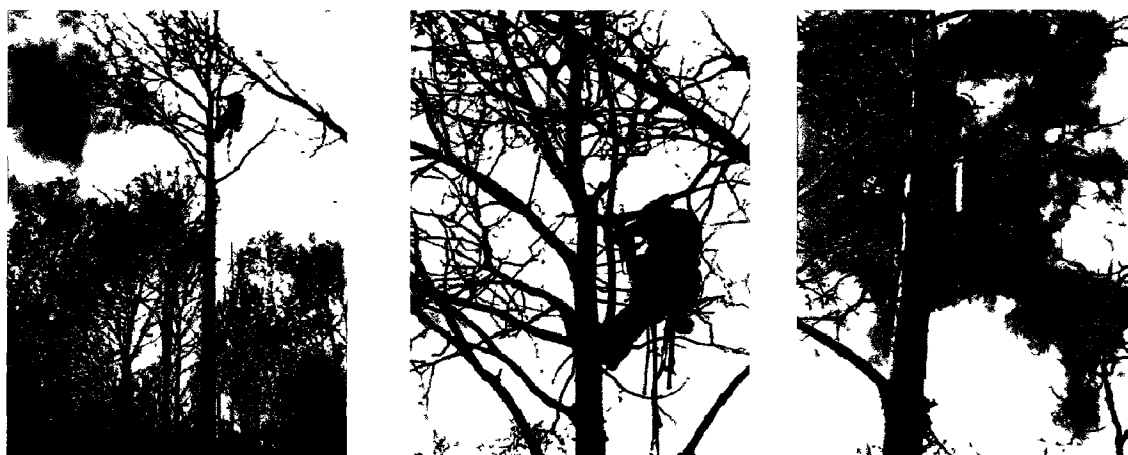


**Figure 15 Scans verticaux**

Préalablement à la prise de données lidars, quatre techniciens forestiers ont participé à la collecte des données de validation pour au plus cinq arbres (dominant ou co-dominant) par placette. Il est à noter que ces sites d'étude sont des placettes permanentes dont le Service canadien des forêts nous a donné accès. Elles ont, en plus d'être délimitées, cinq arbres



identifiés dans le cadre de suivi d'inventaire. Ainsi, pour ces cinq arbres, la hauteur, le DBH et le défilement ont été mesurés, de même que le diamètre d'au plus les cinq branches principales à partir de base de la couronne. La hauteur a été mesurée à l'aide d'un clinomètre, alors que le DHP, le défilement et le diamètre des branches ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Une seule mesure a été notée par paramètre mesuré. Pour le défilement, les techniciens ont grimpé à même le tronc des arbres (Figure 16). Le diamètre a été mesuré à chaque deux mètres, en partant du sol, jusqu'à atteindre un diamètre de la tige de 9 cm. Une fois la base de la cime atteinte, le diamètre des plus grosses branches a été mesuré. Puisqu'il était parfois impossible, voir dangereux, d'atteindre les branches, au plus cinq branches ont été mesurées et identifiées par arbre grimpé. Les arbres grimpés ont été identifiés avec du ruban d'aluminium et du ruban de couleur sur les branches afin de faciliter l'identification de ceux-ci dans le nuage de points (Figure 16, image à droite). Ces rubans servent également de cibles lors de l'assemblage des scans, de même qu'un trépied installé au centre de la placette



**Figure 16 Acquisition des données de validation**

#### **4.1.2 Allemagne**

Le lidar utilisé pour scanner les deux sites d'étude en Allemagne est le LMS-Z360 de RIEGL, en mode premier retour et haute résolution. Les données ont été acquises au mois de mai et juin 2007. Comme il s'agit de peuplements de conifères, sans sous-bois d'importance, la saison de prises de données influençait peu la visibilité du tronc et des branches.

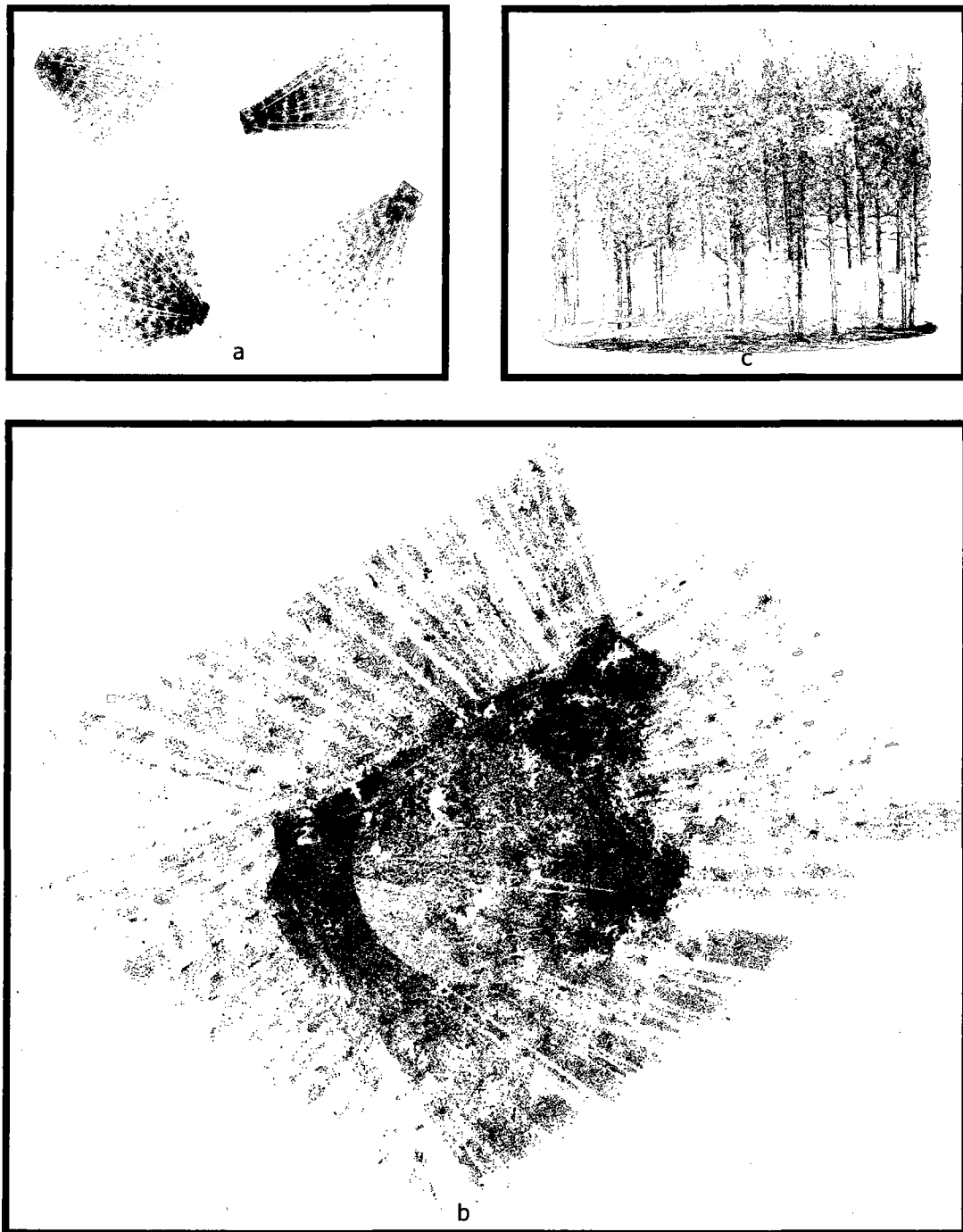
Tout comme dans le cas des placettes du Canada, la stratégie d'échantillonnage en Allemagne consistait en une prise de mesures concentrique (Figure 14), en positionnant trois à quatre stations lidars en périphérie de la placette d'étude. Le LMS-Z360 ayant un angle de vue de  $90^\circ \times 360^\circ$ , deux scans étaient nécessaires afin de balayer une placette par station. De ce fait, 6 à 8 scans ont été nécessaires afin de balayer une placette en entier. Des cibles ont été positionnées à l'intérieur de la zone d'étude afin d'en faciliter l'alignement.

Quant aux données de validation, l'ensemble des arbres des placettes a été abattu au cours des mois qui ont suivi la prise de mesures lidars. Ainsi, à chaque mètre, trois valeurs de diamètre ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse une fois l'arbre au sol, et la moyenne a été utilisée comme valeur de validation. Le DHP a aussi été mesuré de cette façon, alors que la hauteur a été mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer. Aucune mesure sur le diamètre des branches n'a été notée lors de cet inventaire.

## **4.2 Prétraitement des données**

### **4.2.1 Canada**

À l'aide de l'information recueillie sur le terrain (angles et distances) ainsi que des points de contrôle, les scans des placettes ont été assemblés afin d'être regroupés en un seul nuage de points par placette. Cette opération a été réalisée dans le logiciel PointStream. À partir des angles d'inclinaison recueillis sur le terrain, les scans ont été positionnés approximativement les uns par rapport aux autres (Figure 17). Par la suite, à l'aide du module d'alignement, la superposition des scans a été complétée. Ces opérations ont été répétées jusqu'à ce que tous les scans d'une même station soient assemblés. Par la suite, les stations ont été mises ensemble. Pour ce faire, les distances et angles entre les stations mesurés sur le terrain ont été utilisés, puis des points communs (conifère se distinguant des autres, arbre incliné, trépied au centre de la placette, etc.) ont permis d'ajuster l'alignement. Une fois de plus, le module d'alignement a permis de compléter l'assemblage et un fichier .xyz a été créé pour chacune des placettes.



**Figure 17 (a) Scans des quatre stations vus du haut (b) Scans alignés et sélection de la placette (zone grisée) et (c) vue de la placette par les quatre stations**

### **4.2.2 Allemagne**

L'alignement des scans acquis avec le LMS-Z360 a été réalisé à l'aide du logiciel RiSCAN PRO. Des cibles réfléchissantes ont été disposées à l'intérieur des placettes à l'étude avant le balayage avec le lidar. Par la suite, ces cibles ont été identifiées par le logiciel, et en numérotant chacune de celles-ci, le logiciel a pu procéder à un alignement des scans entre eux. Les scans ont été fusionnés, et un fichier .xyz a été créé pour chacune des placettes.

### **4.2.3 Création de fichier arbre**

Comme le logiciel de traitement R-Routine a été développé en fonction de ne considérer qu'un arbre à la fois, il a été nécessaire d'isoler chacun des arbres de validation à l'intérieur de la placette. Pour ce faire, la position des arbres par rapport au centre de la placette a été utilisée et un nuage de points xyz a manuellement été extrait pour chacun des arbres à l'étude. Cette étape a nécessité moins de 5 minutes de prétraitement supplémentaire par arbre.

## **4.3 Traitement des données**

Le traitement des données a été effectué en deux étapes, soit le traitement à l'aide du logiciel Autostem, développé en Irlande, et du logiciel R-Routine, développé en Allemagne. Tous deux présentent des caractéristiques qui les distinguent tel que discuté précédemment.

Le logiciel Autostem permet de traiter un scan en format .xyz représentant l'ensemble d'une placette. Ainsi, pour chaque placette, le nuage de points complet a été donné en entrée. Comme le temps de traitement dépend entre autres des composantes de l'ordinateur, de la taille du fichier et de la complexité du nuage de points, de quelques minutes (placette de l'Allemagne) à parfois six heures (placette mixte de la Gaspésie) de traitement ont été nécessaires une fois l'application lancée. La distance entre deux diamètres mesurés le long de la tige a été fixée à 0,1 m et une interpolation *spline* a été faite pour chacun des défilements. Les résultats obtenus pour les arbres de validation ont été extraits du fichier de sortie.

Pour ce qui est du logiciel R-Routine, le nuage de points de chaque arbre a été traité de façon individuelle. La distance entre deux diamètres mesurés le long de la tige a aussi été fixée à 0,1 m, et une interpolation *spline* a été appliquée pour chacun des défilements, pour fins de comparaison entre les deux logiciels.

#### 4.4 Proposition d'approches pour l'évaluation du diamètre

Suite à l'analyse des paramètres par les deux logiciels, nous proposons une troisième méthode de calcul afin d'évaluer le diamètre de la tige à une hauteur donnée, dans ce cas-ci, le DHP. Cette troisième approche permet de définir une ellipse qui approxime un nuage de points représentant une section de tige définie, plutôt qu'une forme circulaire telle que proposée par les deux logiciels. Cette méthode consiste à construire deux matrices afin d'obtenir une approximation elliptique de la section, et ce, par la méthode de régression linéaire multiple disponible dans Excel. En fait, l'équation (10) générale d'une conique (ellipse, hyperbole, parabole) se traduit par :

$$a.x^2 + 2b.x.y + c.y^2 + 2d.x + 2f.y + g = 0 \quad (10)$$

où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées d'un point de l'ellipse dans le plan et  $a, b, c, d, f, g$  sont les coefficients. En se limitant au cas  $a=1$ , on obtient l'équation (11) réduite suivante :

$$x^2 = A + B.x + C.y + D.x.y + E.y^2 \quad (11)$$

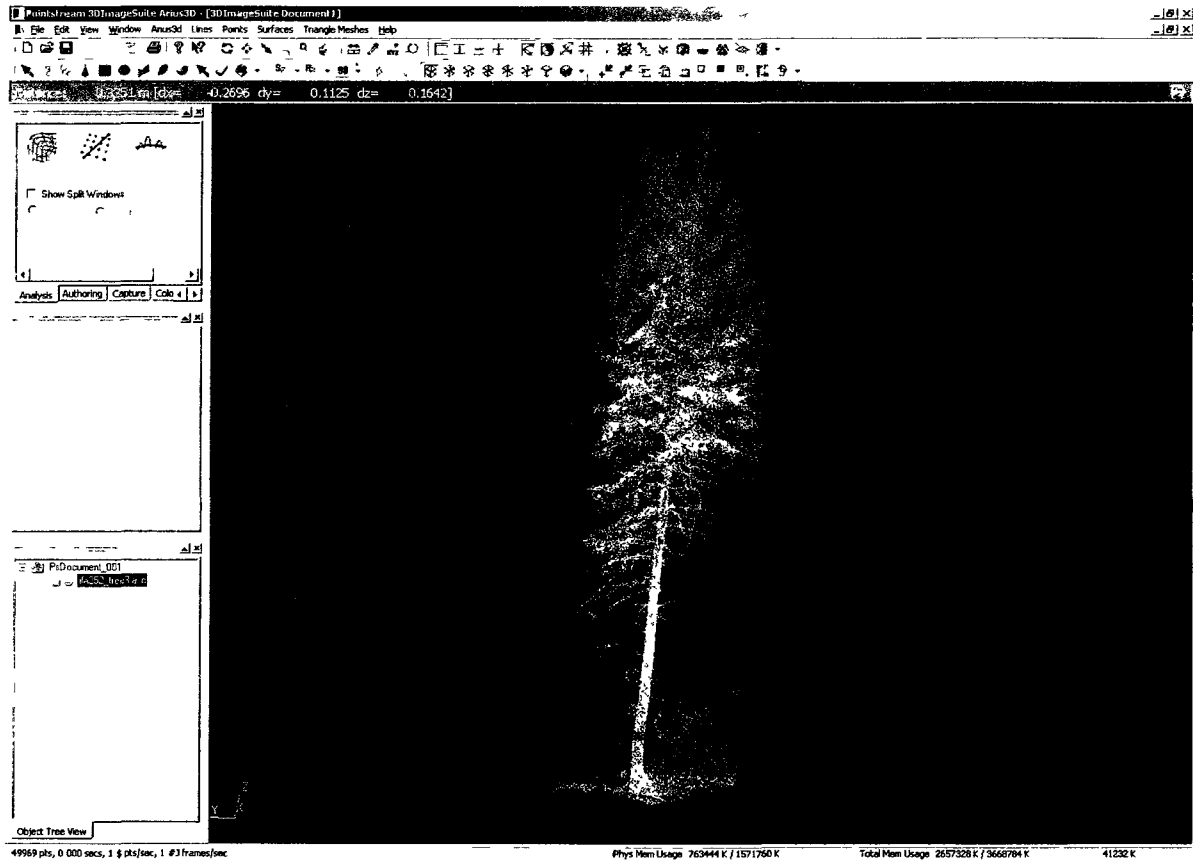
La variable  $x^2$  est alors fonction linéaire des variables  $x, y, x.y$  et  $y^2$  et c'est alors que la technique de la régression linéaire multiple d'Excel est utilisée pour évaluer les constantes  $A, B, C, D$  et  $E$

Une quatrième approche proposée consiste à utiliser le B-spline, ou la courbe à forme libre, pour calculer d'abord le périmètre de la forme, et par la suite, évaluer le diamètre du cercle de même périmètre. Pour appliquer cette méthode, le logiciel FindGraph de UNIPHIZ Lab Software (2010), disponible sur internet a été utilisé.

Une cinquième approche pour déterminer le rayon a également été utilisée, soit l'algorithme de PointStream permettant d'ajuster un cylindre en fonction des points donnés sur une longueur de tige. Il s'agit d'obtenir le rayon en supposant une forme circulaire de la tige.

Cinq DHP ont été utilisés afin de comparer ces quatre méthodes, soit ceux des arbres 23 (bouleau jaune), 36 (érable à sucre), 37 (sapin baumier), 46 (épinette noire) et 114 (épinette de Norvège). Ces arbres ont été sélectionnés par leur diversité et également puisque le DHP évalué par les deux logiciels représentait un faible écart avec les valeurs terrain. Pour ce qui est de la méthode utilisant l'équation de l'ellipse, une moyenne entre les

deux axes obtenus a été faite afin de le comparer aux autres valeurs de DHP. Pour chacune des tiges, une section de la tige, comprise entre 1,25 et 1,35 m a été sélectionné à l'aide du logiciel PointStream et le diamètre a été évalués avec les deux nouvelles approches (Figure 18). Une fois le fichier prêt pour le calcul des données, cette approche a nécessité environ 5 minutes de travail par DHP évalué.

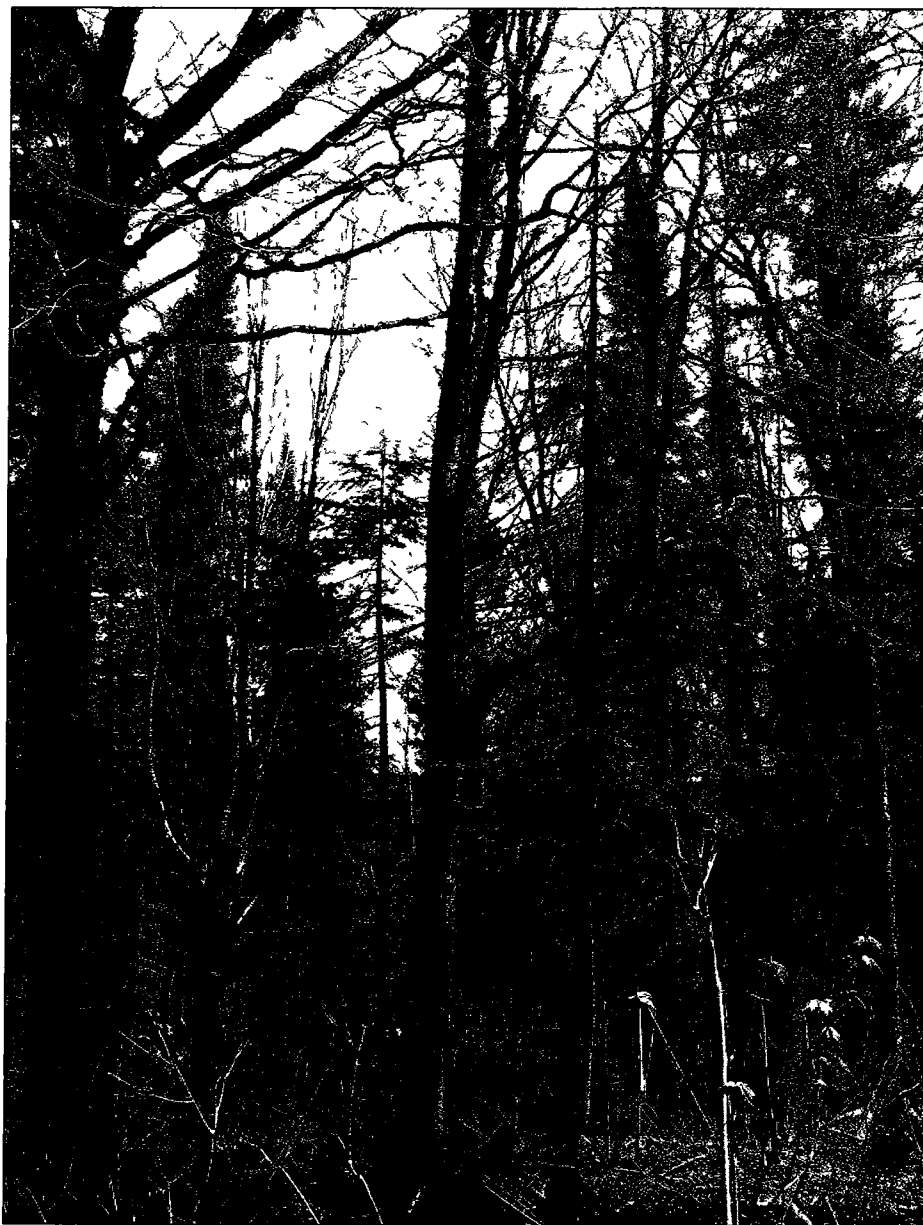


**Figure 18 Sélection de points**

## 4.5 Diamètre des branches

Aucun des deux logiciels étudiés ne permettait, à ce stade-ci de développement, d'évaluer le diamètre des branches à cause de la complexité liée à l'identification automatique de la position des branches et de l'évaluation de leurs paramètres associés. Or, il s'avère que la branchaison est un paramètre d'intérêt et utile lors des inventaires forestiers. Ainsi, afin d'étudier les limites et les possibilités d'évaluation du diamètre des branches, une étude préliminaire, basée sur l'extraction manuelle des branches et de leur diamètre a été réalisée pour cinq branches provenant d'un arbre de la Gaspésie. L'arbre 1 de la placette 195, un

bouleau jaune, a été étudié puisqu'il y avait peu d'occlusion et qu'il avait été visé de trois points de vue différents lors des scans (Figure 19).



**Figure 19 Arbre 1 - placette 195**

Ainsi, les cinq branches principales ont été identifiées et un fichier .xyz pour chacune d'elle a été créé. Une coupe à environ 30 cm de la tige de l'arbre a par la suite été réalisée afin d'évaluer le diamètre de la branche.

## 4.6 Comparaison et analyse des résultats

L'étape de comparaison des résultats et d'analyse représente une étape importante à l'atteinte des objectifs fixés. La donnée lidar présente un niveau de détails important. Ainsi, il a été choisi de valider les résultats par un processus de comparaison du DHP, du défilement du tronc et de la hauteur des arbres obtenus avec les deux logiciels et les données validation recueillies sur le terrain.

Pour le DHP, les erreurs absolues et relatives selon la taille de l'arbre ont été évaluées. Pour la hauteur, l'erreur absolue seulement a été évaluée. Des diagrammes à moustache ont été utilisés afin de représenter ces erreurs de façon graphique et synthétique. Pour ce qui est du défilement, une interpolation *spline* a été appliquée aux valeurs de diamètres calculées par les deux logiciels. Les diamètres calculés ainsi que l'interpolation *spline* sont présentés sous forme d'un graphique, afin d'observer les variations avec les données de validation. Pour ce qui est des branches, un tableau comparatifs est proposé afin d'étudier les valeurs obtenues.

## 5. RÉSULTATS

Les paramètres qui ont été évalués à l'aide des deux logiciels sont la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine et le défilement de la tige. Les résultats présentés ici sont ceux des 39 arbres à l'étude. Par la suite, les deux approches étudiées pour l'évaluation du diamètre des tiges (elliptique et Poinstream) ainsi que l'étude de la branchaison sont présentés.

### 5.1 Hauteur des tiges

La hauteur des arbres évaluée sur le terrain et par les deux logiciels est présentée au Tableau 5. Il a été constaté que le logiciel **Autostem** a, en moyenne, **sous-évalué** la hauteur des arbres de la Gaspésie de **0,5 m** (-2,5%) soit 1,1 m en moyenne pour les 7 conifères et 0,3 m pour les 14 feuillus. Quant aux arbres localisés en Allemagne, Autostem a **sous-estimé** la hauteur de **1,1 m** (-3,1%) en moyenne. Pour ce qui est du traitement dans **R-Routine**, la hauteur des arbres en Gaspésie a été **surestimée** de **0,5 m** (3,9%) soit une moyenne de 0,0 m pour les conifères et une surestimation de 0,8 m pour les feuillus, alors que celle des conifères en Allemagne a été **surestimée** de **0,1 m** (0,5%) en moyenne.



Tableau 5 Hauteur des arbres (m)

Gaspésie

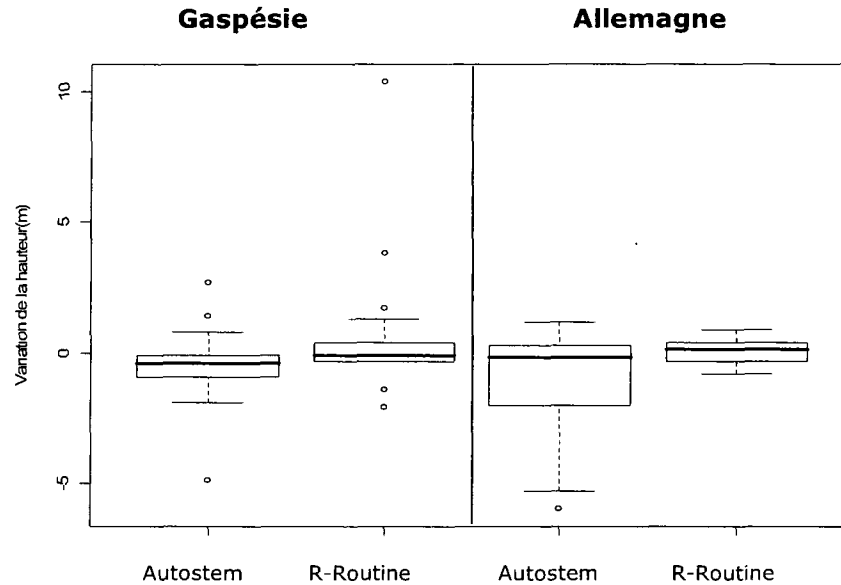
#	Espèce	Validation		AutoStem		R-Routine	
		arbre	terrain	placette	$\Delta H$ en %	arbre	$\Delta H$ en %
1	BOJ	16,3		17,7	8,4	18,0	10,6
2	EPB	24,0		22,4	-6,7	22,6	-5,7
3	BOJ	19,0		18,9	-0,8	19,3	1,8
4	EPB	21,0		21,8	3,6	22,1	5,1
22	BOJ	21,0		19,1	-9,1	19,6	-6,8
23	BOJ	20,0		19,6	-1,9	19,9	-0,5
24	BOJ	16,4		19,1	16,2	20,2	23,3
25	BOJ	20,2		19,3	-4,6	19,9	-1,5
35	BOJ	21,3		19,4	-8,7	19,9	-6,7
36	ERS	18,7		19,2	2,5	20,0	6,9
37	SAB	19,6		19,5	-0,7	20,0	2,1
38	BOJ	17,0		17,0	0,1	14,9	-12,3
39	ERS	19,3		18,3	-5,2	19,0	-1,7
40	BOP	15,7		14,8	-5,9	15,4	-2,1
41	BOP	15,1		14,6	-3,1	14,9	-1,1
42	BOP	14,5		14,0	-3,5	14,4	-0,4
43	BOP	14,1		13,9	-1,5	24,5	73,4
44	EPN	20,3		20,2	-0,5	20,3	0,3
45	EPN	18,1		13,2	-26,8	17,9	-0,9
46	EPN	19,6		19,2	-2,0	19,5	-0,7
47	EPN	16,3		16,0	-1,8	16,2	-0,5

Allemagne

#	Espèce	Validation		AutoStem		R-Routine	
		arbre	terrain	placette	$\Delta H$ en %	arbre	$\Delta H$ en %
112	PIS	34,2		28,2	-17,6	33,4	-2,3
113	ENO	34,6		29,4	-15,3	34,1	-1,6
114	ENO	26,5		27,7	4,6	26,6	0,3
115	ENO	29,2		27,2	-6,9	28,9	-1,1
116	ENO	31,4		31,6	0,6	31,7	0,7
117	ENO	33,6		33,9	0,9	34,1	1,3
118	ENO	27,3		27,8	1,8	28,1	3,1
119	ENO	26,2		27,0	3,0	27,1	3,5
120	ENO	33,4		32,3	-3,4	33,7	0,8
121	ENO	38,3		33,4	-12,8	37,7	-1,6
122	ENO	37,1		33,7	-9,0	36,8	-0,7
123	ENO	38,3		38,4	0,2	38,6	0,8
124	ENO	31,2		31,9	2,1	31,4	0,4
125	ENO	33,7		33,3	-1,1	33,6	-0,3
126	ENO	36,4		36,6	0,5	36,8	1,2
127	ENO	33,0		33,2	0,6	33,4	1,0
128	ENO	35,9		35,5	-1,3	36,0	0,1
129	ENO	34,7		33,7	-3,1	35,7	2,7

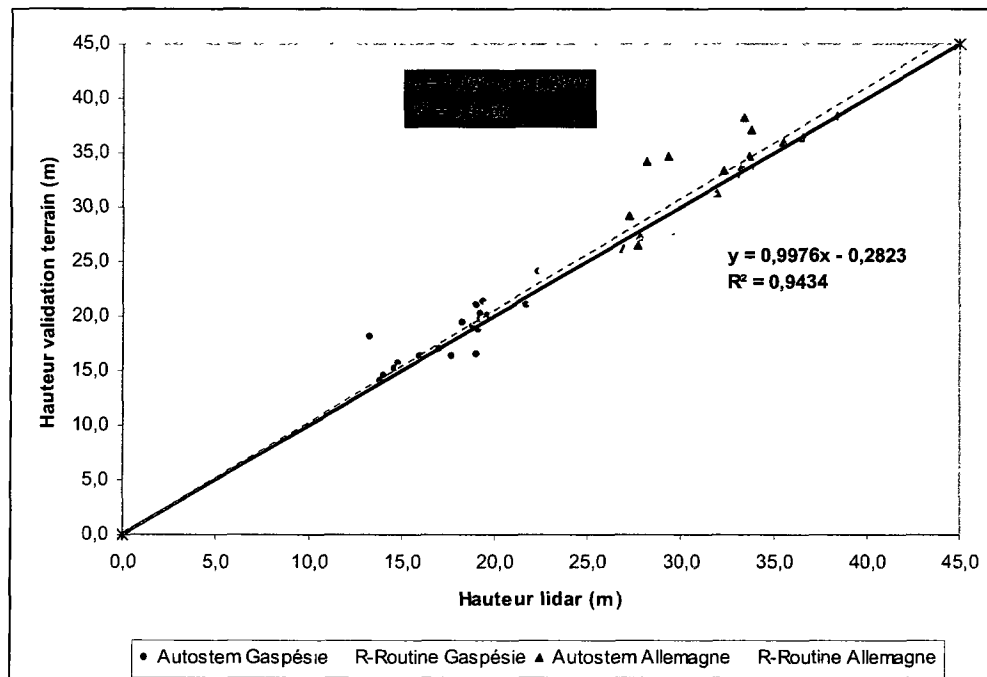
BOJ : Bouleau jaune BOP : Bouleau à papier ENO : Épinette de Norvège EPB : Épinette blanche  
EPN : Épinette noire ERS : Érable à sucre PIS : Pin Sylvestre SAB : Sapin Baumier

La Figure 20 présente la distribution des écarts de la hauteur évaluée avec les deux logiciels et les données de validation terrain. D'une part, on remarque que la boîte centrale de la **distribution** est **similaire** pour les deux logiciels, à l'exception de l'étendue de la boîte d'Autostem pour les arbres de l'Allemagne qui s'étend davantage vers le négatif. Quant à la **médiane**, elle est **presque nulle** dans tous les cas. D'autre part, on retrouve pour chacun des logiciels des valeurs atypiques, tant positives que négatives. Pour les deux logiciels, on retrouve un plus grand nombre de **valeurs atypiques** pour les arbres situés en **Gaspésie**. Ces valeurs correspondent aux tiges 2, 24 et 45 (deux bouleaux jaunes et une épinette noire) avec le logiciel Autostem et aux tiges 1, 24, 38, et 43 (trois bouleaux jaunes et un bouleau à papier) avec R-Routine, tel qu'on a pu le constater au Tableau 5.



**Figure 20 Distribution des erreurs d'estimation de la hauteur**

La Figure 21 présente la dispersion des valeurs de hauteurs obtenues à l'aide d'Autostem et R-Routine (axe des X) par rapport aux données de validation terrain (axe des Y), de part et d'autre de la droite de pente 1 passant par l'origine (0,0). Pour les deux logiciels, le coefficient de détermination est près de 1, soit 0,95 pour Autostem et 0,94 pour R-Routine. Il en est de même pour la pente.



**Figure 21 Hauteurs des données lidar vs données de validation**

## 5.2 Diamètre à hauteur de poitrine (DHP)

Le Tableau 6 présente un résumé des DHP pour les arbres de la Gaspésie et de l'Allemagne ayant été traités dans les deux logiciels, ainsi que l'écart avec les données de validation terrain. En moyenne, le traitement des placettes dans le logiciel **Autostem** a **sous-évalué** le DHP des arbres la Gaspésie de **5,8 cm** (-21,7%), soit 3,4 cm en moyenne pour les conifères et 7,0 cm pour les feuillus. Pour les conifères de peuplements localisés en Allemagne, une **sous-estimation** moyenne de **6,5 cm** (-14,0%) est observée. Quant au traitement d'arbres dans le logiciel **R-Routine**, on observe une **surestimation** moyenne du DHP de **3,5 cm** (9,8%), soit 3,9 cm pour les conifères et 3,3 cm pour les feuillus des peuplements en Gaspésie, et une **surestimation** de **3,0 cm** (6,7%) pour les conifères en Allemagne. En moyenne, pour l'ensemble des arbres, Autostem a sous-évalué de 18,1% le DHP des tiges, et R-Routine a surévalué de 8,4%.

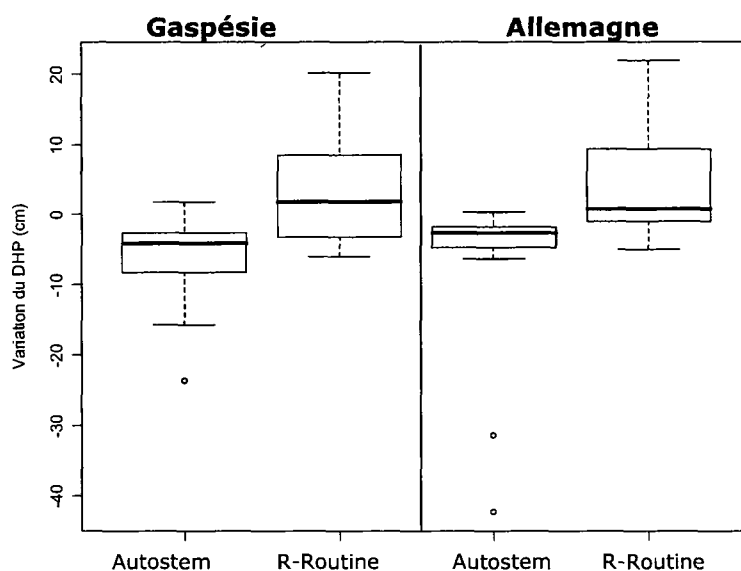
**Tableau 6 DHP (cm)**

Gaspésie							Allemagne						
#	Espèce Validation		Autostem		R-Routine		#	Espèce Validation		Autostem		R-Routine	
	arbre	terrain	placette	Δ DHP %	arbre	Δ DHP %		arbre	terrain	placette	Δ DHP %	arbre	Δ DHP %
1	BOJ	29,2	25,2	-13,8	37,6	28,8	112	PIS	50,0	47,5	-5,1	52,7	5,3
2	EPB	41,6	37,4	-10,2	44,3	6,5	113	ENO	54,1	11,7	-78,4	53,9	-0,4
3	BOJ	43,7	37,4	-14,5	53,9	23,3	114	ENO	21,0	20,8	-0,7	22,2	6,1
4	EPB	32,9	31,1	-5,5	45,4	38,0	115	ENO	35,1	31,8	-9,4	33,1	-5,8
22	BOJ	34,9	26,3	-24,7	55,0	57,6	116	ENO	44,6	13,0	-70,8	43,6	-2,1
23	BOJ	41,3	43,2	4,6	47,0	13,8	117	ENO	46,5	44,4	-4,4	48,6	4,6
24	BOJ	24,0	8,3	-65,6	31,4	30,8	118	ENO	33,2	27,2	-17,9	33,5	1,0
25	BOJ	46,5	22,9	-50,8	56,7	21,9	119	ENO	30,9	29,2	-5,6	30,2	-2,2
35	BOJ	41,4	39,0	-5,7	35,4	-14,5	120	ENO	41,5	36,8	-11,3	41,8	0,7
36	ERS	20,3	17,2	-15,4	24,8	22,2	121	ENO	53,3	48,6	-8,8	51,6	-3,1
37	SAB	30,3	29,1	-4,0	28,9	-4,6	122	ENO	49,4	43,1	-12,7	44,5	-9,9
38	BOJ	26,4	23,9	-9,7	26,7	1,1	123	ENO	61,7	59,4	-3,6	71,5	15,9
39	ERS	18,0	14,7	-18,3	19,8	10,0	124	ENO	38,5	35,9	-6,7	48,2	25,4
40	BOP	24,9	20,4	-18,2	22,4	-10,0	125	ENO	36,1	34,4	-4,7	31,6	-12,4
41	BOP	18,7	9,0	-51,8	15,5	-17,1	126	ENO	43,2	42,4	-1,9	65,1	50,7
42	BOP	16,7	9,3	-44,5	11,0	-34,1	127	ENO	44,9	45,3	0,8	55,3	23,1
43	BOP	20,2	12,0	-40,6	15,6	-22,8	128	ENO	51,3	49,2	-4,1	53,0	3,3
44	EPN	24,1	20,9	-13,2	20,4	-15,4	129	ENO	44,8	41,5	-7,2	54,2	21,1
45	EPN	26,1	16,2	-38,0	22,7	-13,0							
46	EPN	26,8	26,2	-2,1	28,5	6,5							
47	EPN	24,8	21,6	-12,9	43,6	75,8							

**BOJ** : Bouleau jaune **BOP** : Bouleau à papier **ENO** : Épinette de Norvège **EPB** : Épinette blanche  
**EPN** : Épinette noire **ERS** : Érable à sucre **PIS** : Pin Sylvestre **SAB** : Sapin Baumier

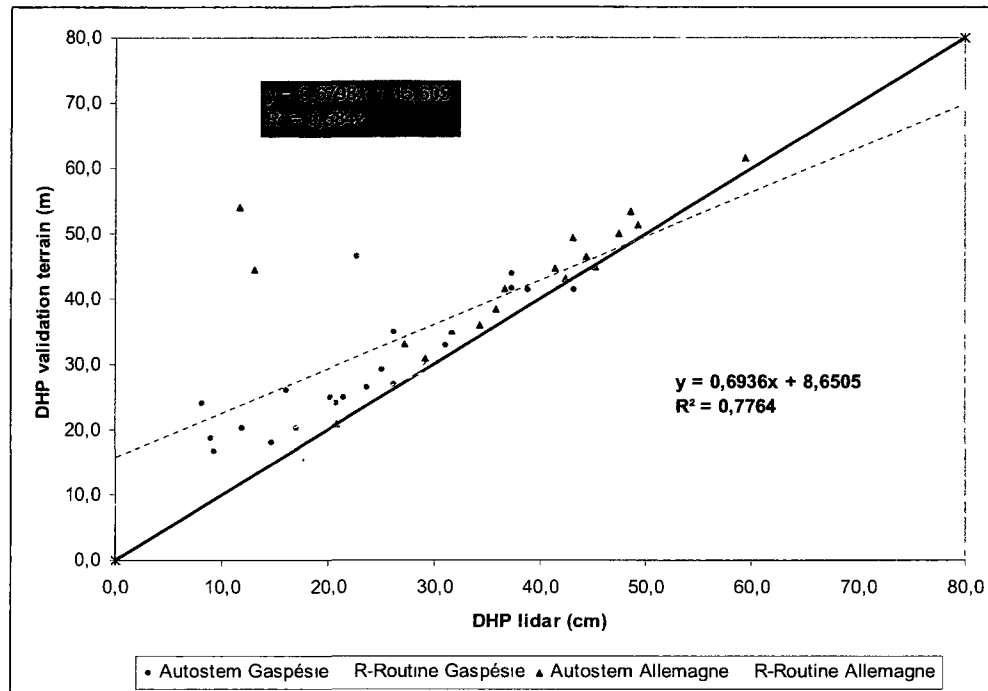
La Figure 22 présente la distribution de la variation des DHP avec les deux logiciels, pour les sites de la Gaspésie et d'Allemagne. On remarque d'une part que la **boîte centrale**, qui contient 50% des valeurs, est **plus étendue** avec **R-Routine**, et qu'il y a **asymétrie des moustaches** plus importante. Dans le cas d'**Autostem**, des **valeurs atypiques** sont présentes dans les deux cas, mais l'**étendue** des données est plus **centrée** autour de la

médiane. Ces valeurs atypiques correspondent à la tige 25 (bouleau jaune) pour la Gaspésie et aux tiges 113 et 116 (épinette de Norvège) en Allemagne. Elles s'expliquent par l'occlusion de ces tiges par d'autres arbres lors du scan de la placette.



**Figure 22 Distribution des erreurs d'estimation du DHP**

La Figure 23 présente la dispersion des valeurs de DHP obtenues à l'aide d'Autostem et R-Routine (axe des X) par rapport aux données de validation terrain (axe des Y), de part et d'autre de la droite de pente 1 passant par l'origine (0,0). On observe un meilleur coefficient de détermination pour les données R-Routine, avec une valeur de 0,78, alors que celui d'Autostem est de 0,58. De plus, on remarque que les logiciels ont tendance à surévaluer les DHP pour les tiges de plus petits diamètres (inférieure à 49 cm pour Autostem et 28 cm pour R-Routine) et sous-évalués les diamètres plus grands.



**Figure 23 DHP des données lidar vs données de validation**

### 5.3 Surface terrière

À partir du DHP, un autre paramètre d'intérêt peut être évalué, soit la **surface terrière** qui représente la surface en m<sup>2</sup> à la hauteur du DHP pour un arbre. La surface terrière des 39 arbres à l'étude est présentée au Tableau 7, et la variation obtenue par rapport à la validation terrain est exprimée en pourcentage. Pour ce qui est d'Autostem, les variations sont comprises entre -95,3% et 9,4% avec une valeur médiane de -19,4%, alors que pour R-Routine, les variations sont comprises entre -56,6% et une valeur extrême de 209,4%, alors que la médiane est de 9,3%. La surface terrière totale des placettes n'est pas présentée ici, puisque le DHP n'a pas été évalué pour l'ensemble des arbres des placettes.

Tableau 7 Surface terrière (m<sup>2</sup>)

Gaspésie						Allemagne							
#	Espèce arbre	Validation terrain	Autostem		R-Routine		#	Espèce arbre	Validation terrain	Autostem		R-Routine	
			placette	Δ st %	arbre	Δ st %				placette	Δ st %	arbre	Δ st %
1	BOJ	0,07	0,05	-25,8	0,11	65,8	112	PIS	0,20	0,18	-9,90	0,22	10,9
2	EPB	0,14	0,11	-19,3	0,15	13,4	113	ENO	0,23	0,01	-95,35	0,23	-0,8
3	BOJ	0,15	0,11	-26,9	0,23	52,1	114	ENO	0,03	0,03	-1,43	0,04	12,5
4	EPB	0,09	0,08	-10,6	0,16	90,4	115	ENO	0,10	0,08	-17,97	0,09	-11,3
22	BOJ	0,10	0,05	-43,3	0,24	148,4	116	ENO	0,16	0,01	-91,46	0,15	-4,1
23	BOJ	0,13	0,15	9,4	0,17	29,5	117	ENO	0,17	0,15	-8,63	0,19	9,3
24	BOJ	0,05	0,01	-88,2	0,08	71,2	118	ENO	0,09	0,06	-32,53	0,09	1,9
25	BOJ	0,17	0,04	-75,8	0,25	48,7	119	ENO	0,07	0,07	-10,82	0,07	-4,4
35	BOJ	0,13	0,12	-11,2	0,10	-26,9	120	ENO	0,14	0,11	-21,41	0,14	1,3
36	ERS	0,03	0,02	-28,5	0,05	49,2	121	ENO	0,22	0,19	-16,77	0,21	-6,1
37	SAB	0,07	0,07	-7,9	0,07	-9,0	122	ENO	0,19	0,15	-23,81	0,16	-18,8
38	BOJ	0,05	0,04	-18,4	0,06	2,3	123	ENO	0,30	0,28	-7,07	0,40	34,4
39	ERS	0,03	0,02	-33,3	0,03	21,0	124	ENO	0,12	0,10	-12,97	0,18	57,1
40	BOP	0,05	0,03	-33,0	0,04	-19,1	125	ENO	0,10	0,09	-9,09	0,08	-23,2
41	BOP	0,03	0,01	-76,8	0,02	-31,3	126	ENO	0,15	0,14	-3,71	0,33	127,2
42	BOP	0,02	0,01	-69,2	0,01	-56,6	127	ENO	0,16	0,16	1,61	0,24	51,5
43	BOP	0,03	0,01	-64,8	0,02	-40,4	128	ENO	0,21	0,19	-7,98	0,22	6,8
44	EPN	0,05	0,03	-24,7	0,03	-28,3	129	ENO	0,16	0,14	-13,96	0,23	46,6
45	EPN	0,05	0,02	-61,6	0,04	-24,4							
46	EPN	0,06	0,05	-4,2	0,06	13,5							
47	EPN	0,05	0,04	-24,1	0,15	209,1							

**BOJ** : Bouleau jaune **BOP** : Bouleau à papier **ENO** : Épinette de Norvège **EPB** : Épinette blanche  
**EPN** : Épinette noire **ERS** : Érable à sucre **PIS** : Pin Sylvestre **SAB** : Sapin Baumiér

L'erreur sur l'estimation du DHP est importante lors de l'évaluation de la surface terrière. En fait, l'erreur sur cette dernière tient compte de la valeur du DHP élevé au carré. À titre d'exemple, une surestimation de 1% sur le DHP augmentera l'erreur sur la surface terrière à 2%, alors qu'une surestimation de 10%, sera traduite par une erreur de 21% sur la surface terrière. Cette erreur peut être évaluée par l'équation polynomiale de degré 2 donnée par l'équation suivante

$$E = 0,01x^2 + 2x + r \quad (13)$$

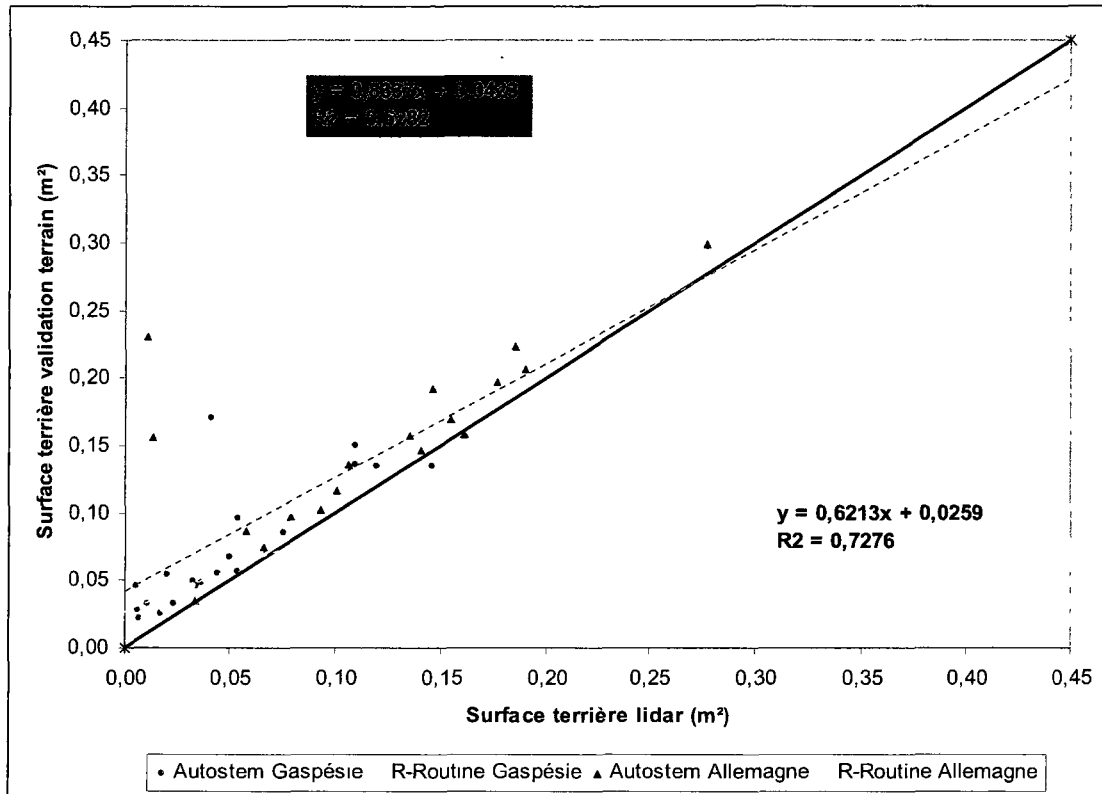
où

$E$  erreur en % de la surface terrière

$x$  erreur en % du DHP

$r$  résidus

La Figure 24 présente la dispersion des valeurs de surface terrière obtenues à l'aide d'Autostem et R-Routine (axe des X) par rapport aux données de validation terrain (axe des Y), de part et d'autre de la droite de pente 1 passant par l'origine (0,0). Les coefficients de détermination pour Autostem et R-Routine sont de 0,63 et 0,73 respectivement. Tout comme pour le DHP, on remarque que les deux logiciels ont tendance à surévaluer les valeurs des plus petites surfaces terrières et à sous-estimer celles plus importantes.



**Figure 24 Surface terrière des données lidar vs données de validation**

## 5.4 Nouvelles approches proposées

Quant aux résultats obtenus avec les deux approches proposées (section 4.4), elles démontrent que la méthode de l'ellipse par régression linéaire, par l'utilisation du B-spline et la méthode de PointStream permettent d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus avec Autostem et R-Routine (Tableau 8). Pour ce qui est de l'approche elliptique, les deux rayons de l'ellipse sont présentés de même qu'une moyenne du DHP évaluée à partir de ces deux rayons. On constate qu'on obtient les mêmes valeurs de DHP à au plus 0,3 cm près avec la méthode de PointStream, du B-Spline et celle de l'ellipse. D'autre part, les résultats vont davantage dans le même sens que ceux obtenus avec Autostem que R-Routine. Il s'avère statistiquement difficile de tirer des conclusions ici, puisque seulement cinq DHP ont été étudiés et comparés par les cinq approches utilisant les données du lidar terrestre.

**Tableau 8 DHP (en cm) comparés par 4 méthodes**

#	Espèce arbre	Validation terrain	Ellipse				B-spline		PointStream		Autostem		R-Routine	
			rayon 1	rayon 2	DHP	$\Delta$ DHP	DHP	$\Delta$ DHP	DHP	$\Delta$ DHP	DHP	$\Delta$ DHP	DHP	$\Delta$ DHP
23	BOJ	41,3	20,0	23,2	43,2	1,9	43,2	1,9	43,4	2,1	43,2	1,9	47,0	5,7
36	ERS	20,3	8,1	9,9	18,0	-2,3	18,1	-2,2	18,2	-2,1	17,2	-3,1	24,8	4,5
37	SAB	30,3	14,8	15,2	30,0	-0,3	29,9	-0,4	29,8	-0,5	29,1	-1,2	28,9	-1,4
46	EPN	26,8	12,2	14,1	26,3	-0,5	26,5	-0,3	27,0	0,2	26,2	-0,6	28,5	1,7
114	ENO	21,0	10,6	11,1	21,7	0,7	21,4	0,4	21,6	0,6	20,8	-0,2	22,2	1,2

## 5.5 Défilement de la tige

Sur les 39 défilements évalués (Annexe 2), six sont présentés ici, soit trois défilements dont les résultats typiques obtenus (Figure 25), suivis de trois défilements où des problèmes majeurs ont été identifiés (Figure 26). Les défilements sont présentés de sorte que sur le graphique de gauche, on peut observer les diamètres évalués à l'aide des deux logiciels (Autostem en vert, R-Routine en jaune) auxquels sont superposées les données de validation (en rouge). Quant au graphique de droite on y retrouve le résultat du spline issu des diamètres évalués. Le défilement de trois première tiges (39, 45, 120) de la Figure 25 représentent des exemples typiques obtenus. Il s'agit d'un érable à sucre (#39), d'une épinette noire (#45) et d'une épinette de Norvège (#120).



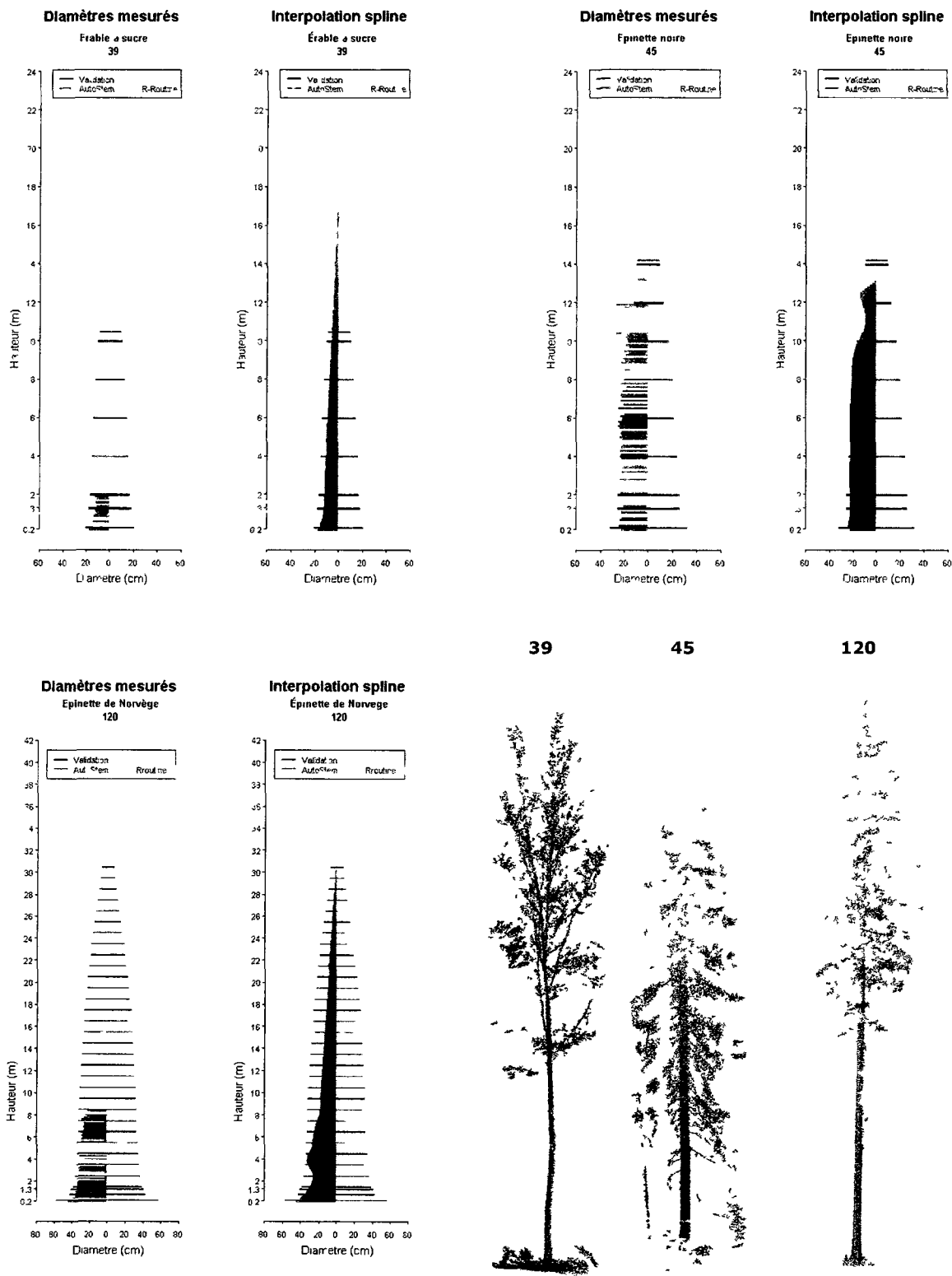
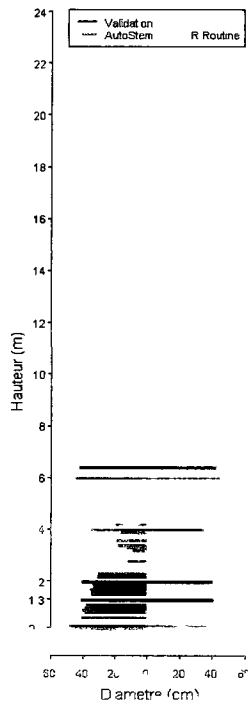
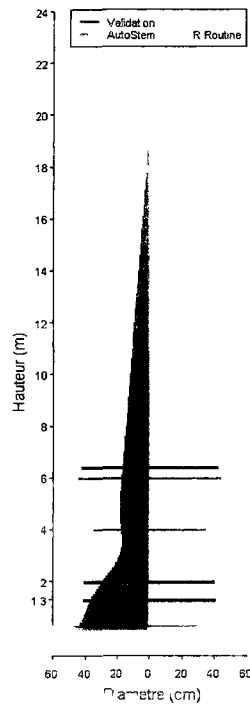
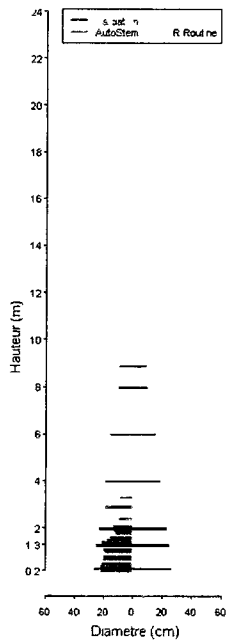
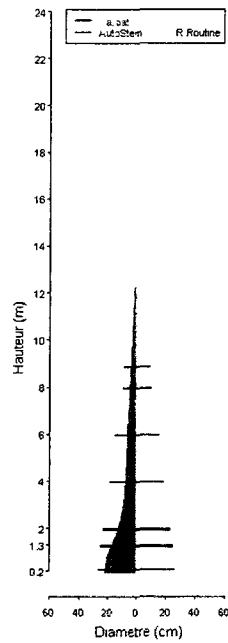
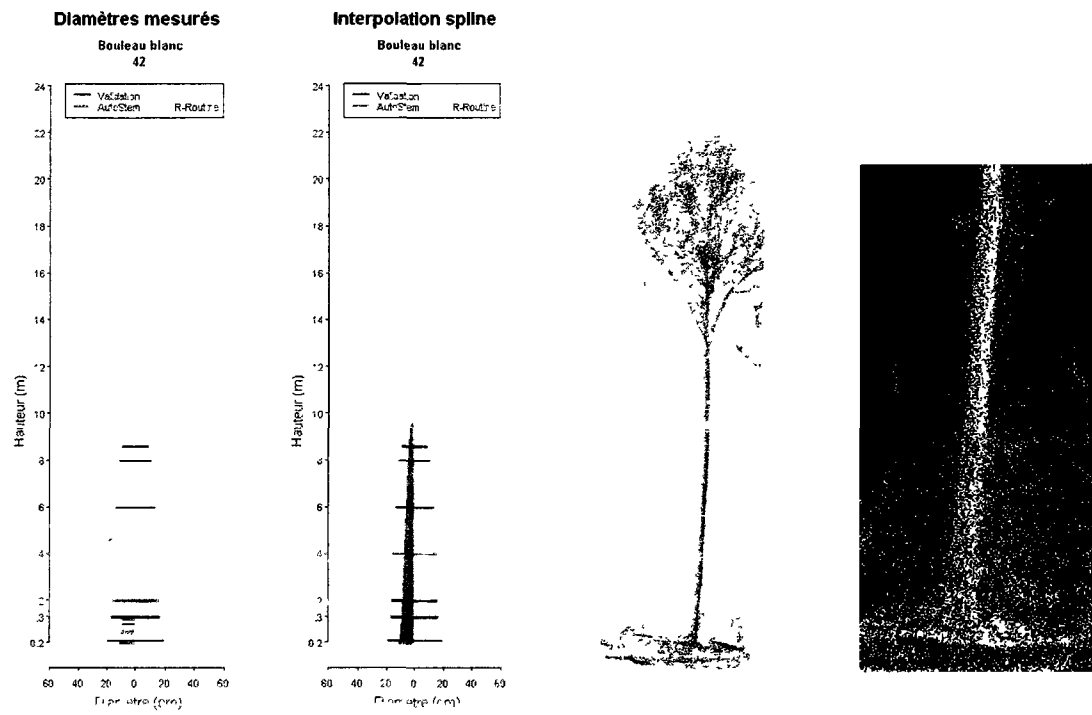


Figure 25 Exemples de défilements typiques

Pour la **tige 39**, le logiciel Autostem a permis d'évaluer les diamètres inférieurs à 2 m, alors que le logiciel R-Routine a été en mesure d'évaluer les diamètres supérieurs à 4 m. On remarque également une sous-estimation légèrement plus importante avec le logiciel Autostem par rapport aux données de validation terrain. Quant à la **tige 45**, Autostem a été en mesure d'évaluer le diamètre sur presque l'ensemble du tronc, et ce, jusqu'à une hauteur de plus de 13 m. Cependant, avec le logiciel R-Routine l'évaluation des diamètres a été limitée à une hauteur de 4 m, faisant en sorte qu'un nombre restreint de diamètres a été évalué avec R-Routine et que ceux-ci sont très concentrés sur une partie limitée de la tige. En comparant les deux splines de l'arbre 45, on constate que R-Routine parvient à un défilement sous-estimé, alors que Autostem se rapproche de la validation terrain. Pour ce qui est de la **tige 120**, Autostem a été en mesure d'évaluer le diamètre jusqu'à une hauteur de près de 9 m, alors qu'avec R-Routine l'évaluation est jusqu'à 12 m environ. Le spline calculé pour présenter le défilement permet de constater que le logiciel Autostem a tendance à grandement sous-évaluer le diamètre pour l'arbre 120, alors que les résultats obtenus avec R-Routine sont très près de la validation terrain, avec une légère surestimation.

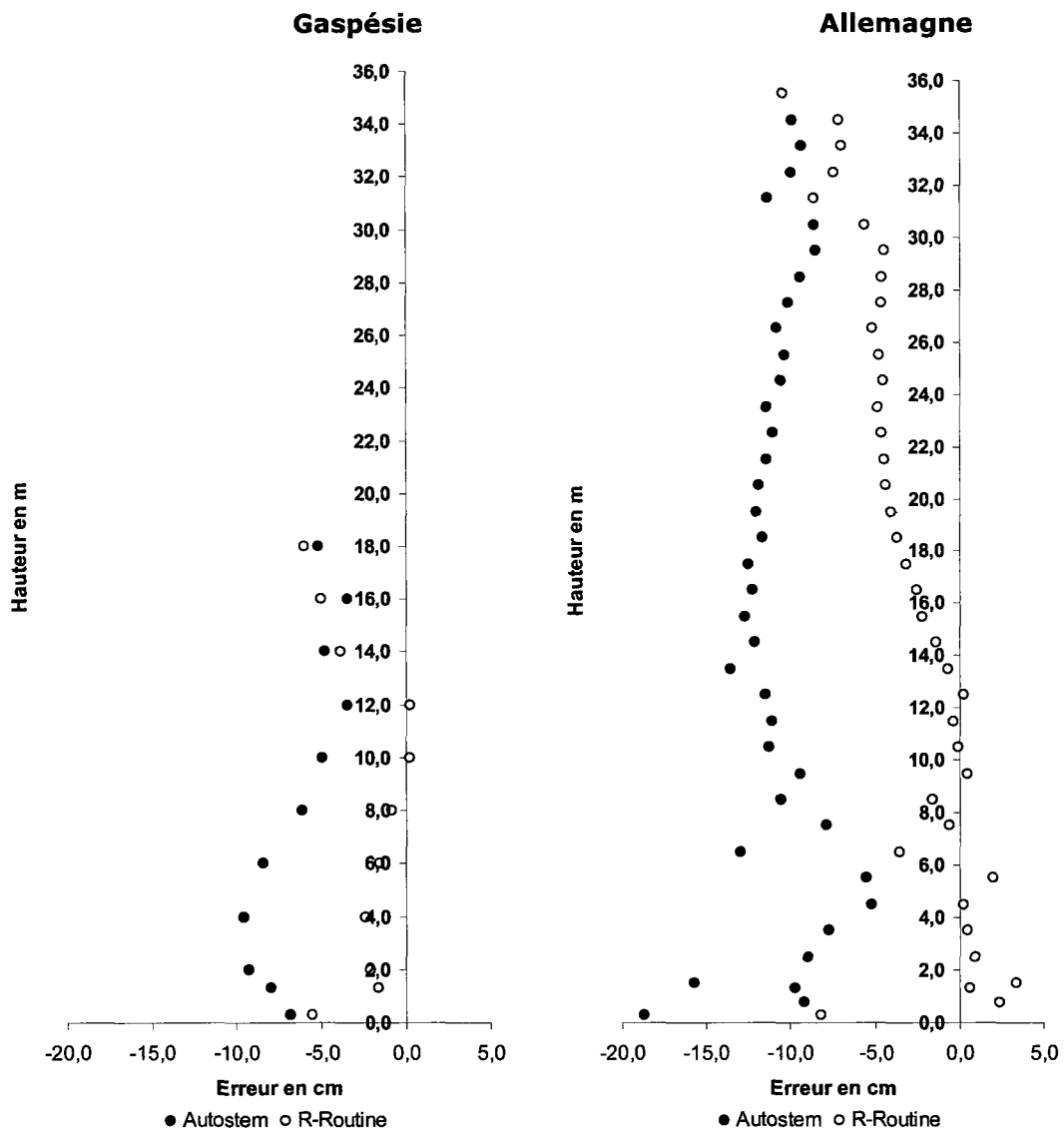
Les trois défilements de tiges suivantes (Figure 26) représentent des cas typiques de difficultés rencontrées par un ou les deux logiciels lors de l'évaluation des diamètres du défilement. Il s'agit des arbres 23, 40, 42; soit un bouleau jaune et deux bouleaux blancs. Pour la **tige 23**, les deux logiciels n'ont pu évaluer le diamètre dès les premiers mètres, et ce, en raison de l'**inclinaison de la tige**. Comme le montre l'image de l'arbre, le tronc principal est incliné. Or, les deux logiciels ont été développés de sorte à évaluer les diamètres situés dans un même axe vertical. L'image de droite montre les diamètres que le logiciel Autostem a évalués. On constate que ceux en rouge et en bleu ne sont pas représentatif de ce qui est réellement observé. Pour la **tige 40**, on remarque, tout comme la tige 20, que celle-ci est légèrement inclinée, et qu'il y a également une **tige secondaire**, qui est présente jusqu'à environ 3,5 m du sol. Le logiciel Autostem, lors du calcul des diamètres dans un axe vertical, a évalué le défilement pour la tige secondaire, tel que montré par les cercles bleus et rouges de la figure de droite. Quant à R-Routine, il a suivi la tige principale et a ainsi évalué le défilement jusqu'à une hauteur de 7 m environ, soit à la séparation de la tige principale. La **tige 42** présente une situation principalement rencontrée pour les arbres où le problème d'occlusion est important, où encore, pour les arbres éloignés des stations de scan. Ainsi, en raison de la **faible densité de points**, les deux logiciels n'ont pu évaluer correctement les diamètres le long de la tige. Ainsi, on constate qu'il y a eu une sous-estimation, et ce, dans les deux cas.

**Diamètres mesures**Bouleau jaune  
23**Interpolation spline**Bouleau jaune  
23**Diamètres mesures**Bouleau blanc  
40**Interpolation spline**Bouleau blanc  
40



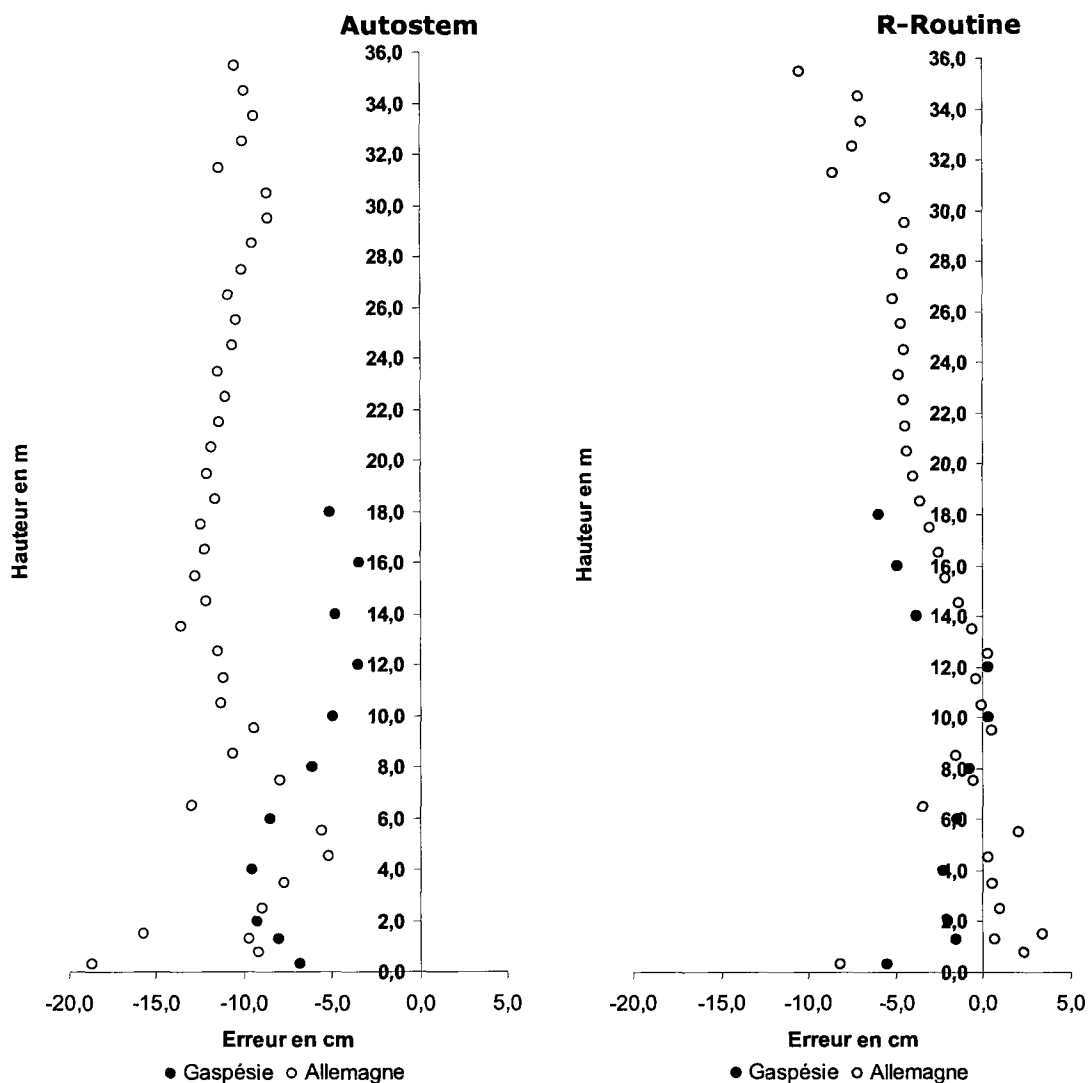
**Figure 26 Exemples de défilements problématiques**

La Figure 27 présente l'écart moyen entre les données de validation terrain et les diamètres évalués par les deux logiciels. On constate que les **écarts obtenus avec R-Routine** sont, de façon générale, **inférieurs** à ceux obtenus avec le logiciel Autostem, et ce, pour les peuplements de la Gaspésie et de l'Allemagne. L'erreur moyenne pour les tiges de la Gaspésie est de -6,3 cm avec Autostem et -2,5 avec R-Routine. Les deux séries de données ont un écart-type de 2,2. Pour les tiges de l'Allemagne, la sous-estimation moyenne avec Autostem est de 10,7 cm, avec un écart-type de 2,4, alors qu'elle est de 3,0 cm avec un écart-type de 3,3 pour R-Routine.



**Figure 27 Erreur diamétrale moyenne : comparaison entre les deux logiciels**

Il s'avère aussi intéressant de comparer les erreurs pour les peuplements hétérogènes de la Gaspésie, avec ceux homogène de l'Allemagne avec un même logiciel. La Figure 28 présente cette comparaison : la figure de gauche présente les erreurs avec le logiciel Autostem et celle de droite avec R-Routine. On constate que l'**erreur** obtenue sur les données de la **Gaspésie** est généralement **inférieure** à celle sur les données de l'Allemagne, et ce, peu importe le logiciel. En fait, l'erreur moyenne sur les données de la Gaspésie est de -6,3 cm comparativement à -10,7 cm en moyenne pour l'Allemagne avec comme écart-type 2,2 et 2,4. Pour les erreurs obtenues avec **R-Routine**, les valeurs de la Gaspésie et de l'Allemagne sont **davantage similaires** que celles obtenues avec Autostem, avec une erreur moyenne de -2,5 cm avec un écart-type de 2,2 et -3,0 cm avec un écart-type de 3,3, respectivement.



**Figure 28 Erreur diamétrale moyenne : comparaison entre les peuplements**

## 5.6 Volume

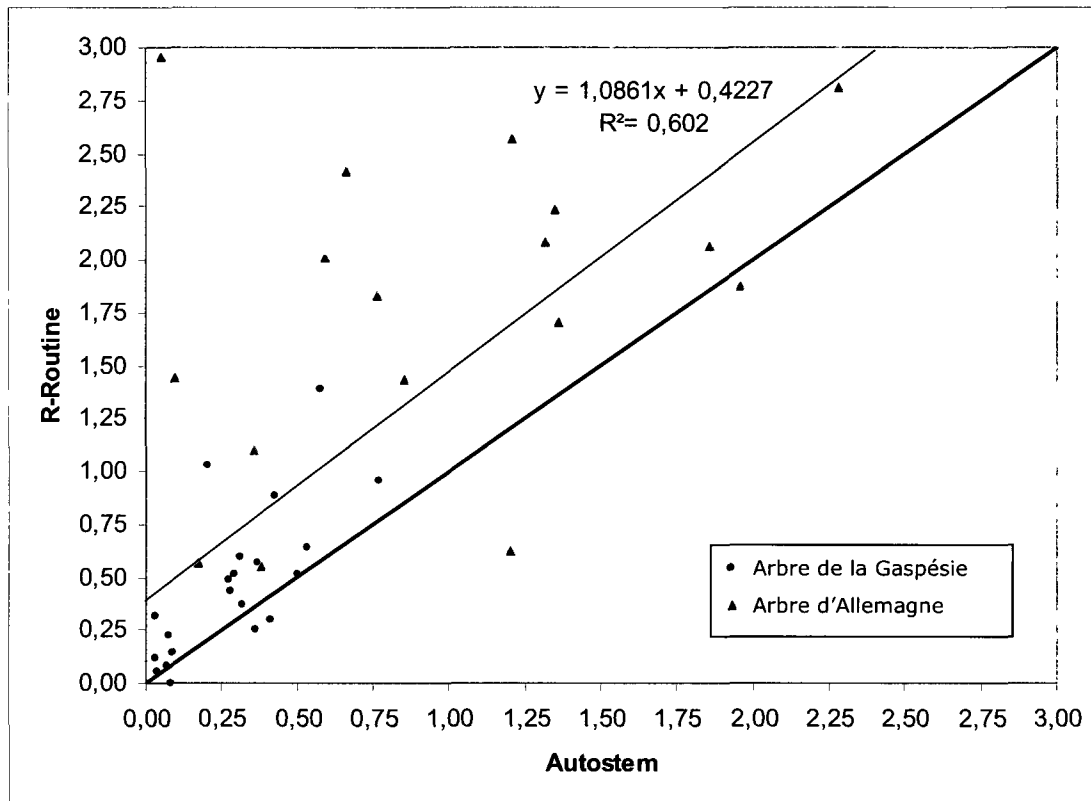
Le volume des arbres a été évalué à partir de deux équations présentées à la section 2.1.4. Les équations de **Smalian** et celle du **tronc de cône** ont été privilégiées, puisqu'elles ne nécessitent que deux paramètres d'entrée, soit le diamètre au gros bout et le diamètre au petit bout pour chaque tronçon d'arbre. Le Tableau 9, présente les volumes (en m<sup>3</sup>) calculés à partir des données de défilement obtenues par Autostem et R-Routine (Section 5.5). Comme on peut le constater, pour un même logiciel, l'équation du tronc de cône et celle de Smalian offrent des résultats identiques. La différence entre les volumes évalués pour un même arbre est fonction du logiciel utilisé. Cette différence est présentée dans la colonne de droite du tableau.

**Tableau 9 Volume des arbres en m<sup>3</sup>**

Gaspésie						Allemagne							
#	Espèce arbre	Autostem		R-Routine		Δ volume	#	Espèce arbre	Autostem		R-Routine		Δ volume
		Cone	Smalian	Cone	Smalian				Cone	Smalian	Cone	Smalian	
1	BOJ	0,31	0,31	0,59	0,59	-0,28	112	PIS	1,21	1,21	2,57	2,57	-1,36
2	EPB	0,77	0,77	0,95	0,95	-0,18	113	ENO	0,05	0,05	2,96	2,96	-2,91
3	BOJ	0,27	0,27	0,48	0,48	-0,21	114	ENO	0,38	0,38	0,55	0,55	-0,17
4	EPB	0,53	0,53	0,64	0,64	-0,10	115	ENO	0,85	0,85	1,43	1,43	-0,58
22	BOJ	0,37	0,37	0,57	0,57	-0,20	116	ENO	0,66	0,66	2,41	2,41	-1,75
23	BOJ	0,43	0,43	0,88	0,88	-0,46	117	ENO	1,86	1,86	2,06	2,06	-0,20
24	BOJ	0,03	0,03	0,32	0,32	-0,29	118	ENO	0,36	0,36	1,10	1,10	-0,74
25	BOJ	0,58	0,58	1,39	1,39	-0,81	119	ENO	0,17	0,17	0,56	0,56	-0,39
35	BOJ	0,20	0,20	1,03	1,03	-0,82	120	ENO	0,76	0,76	1,82	1,82	-1,06
36	ERS	0,08	0,08	0,22	0,22	-0,15	121	ENO	2,28	2,28	2,81	2,81	-0,53
37	SAB	0,50	0,50	0,52	0,52	-0,02	122	ENO	0,59	0,59	2,01	2,01	-1,42
38	BOJ	0,28	0,28	0,43	0,43	-0,15	123	ENO	1,96	1,96	1,87	1,87	0,09
39	ERS	0,09	0,09	0,15	0,15	-0,05	124	ENO	3,39	3,39	4,52	4,52	-1,13
40	BOP	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	125	ENO	0,10	0,10	1,45	1,45	-1,35
41	BOP	0,03	0,03	0,12	0,12	-0,09	126	ENO	1,20	1,20	0,62	0,62	0,58
42	BOP	0,04	0,04	0,05	0,05	-0,01	127	ENO	1,36	1,36	1,70	1,70	-0,34
43	BOP	0,07	0,07	0,08	0,08	-0,01	128	ENO	1,35	1,35	2,23	2,23	-0,88
44	EPN	0,32	0,32	0,37	0,37	-0,05	129	ENO	1,32	1,32	2,08	2,08	-0,76
45	EPN	0,41	0,41	0,29	0,29	0,12							
46	EPN	0,29	0,29	0,51	0,51	-0,22							
47	EPN	0,36	0,36	0,25	0,25	0,11							

**BOJ** : Bouleau jaune **BOP** : Bouleau à papier **ENO** : Épinette de Norvège **EPB** : Épinette blanche  
**EPN** : Épinette noire **ERS** : Érable à sucre **PIS** : Pin Sylvestre **SAB** : Sapin Baumier

La Figure 29 permet de comparer les volumes estimés à partir des valeurs de défilement obtenus par R-Routine et Autostem. La droite représente une courbe de pente 1, passant par l'origine (0,0). On constate que l'évaluation du volume par R-Routine est généralement supérieure à l'évaluation faite par Autostem, et ce, dans 34 cas sur 39, tant pour les peuplements de la Gaspésie (hétérogène) que ceux d'Allemagne (homogène). Le coefficient de détermination est de 0,6.



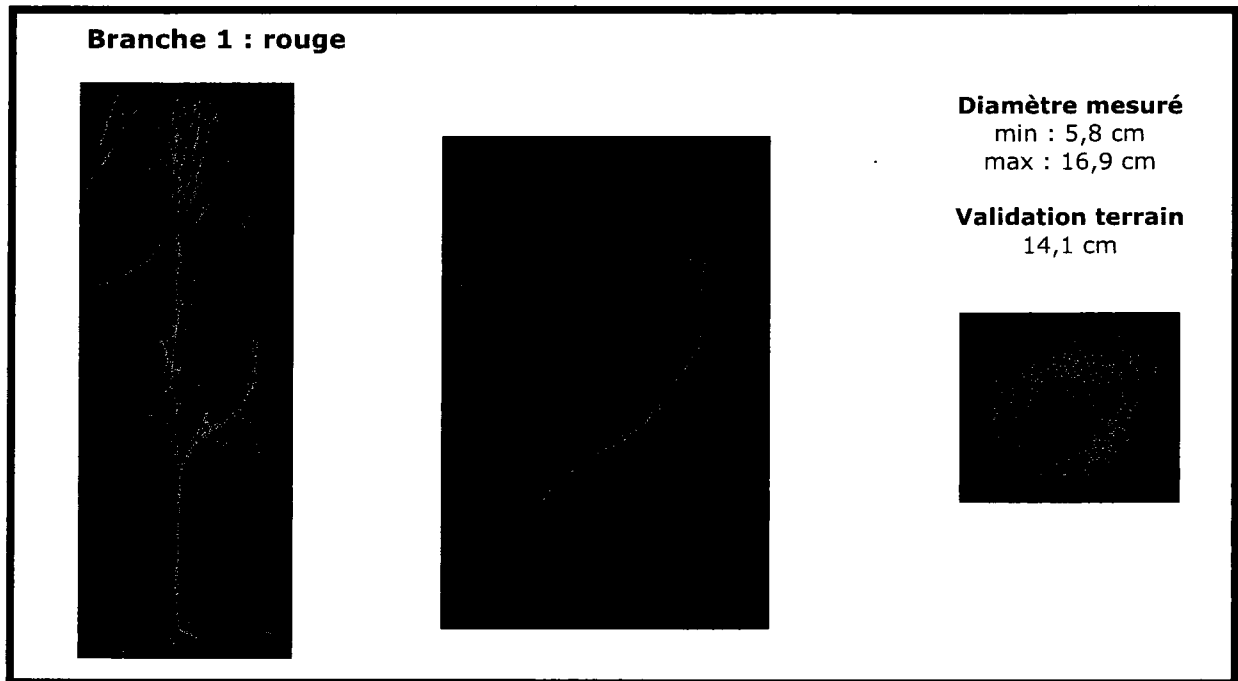
**Figure 29 Comparaison du volume entre R-Routine et Autostem (en m<sup>3</sup>)**

## 5.7 Diamètre des branches

L'étape première consistait à l'identification des branches. En comparant les données lidars avec la photo prise sur le terrain, il a été possible d'identifier les cinq branches principales (Figure 30 à Figure 34). Par la suite, lors de la coupe de la branche à une distance d'environ 30 m de la tige, afin d'éviter le renflement, on constate que seulement pour les branches 1 et 3 le diamètre a pu être évalué. Pour les branches 2, 4 et 5, il s'agit d'un nuage de points duquel il s'est avéré impossible d'évaluer le diamètre. Le diamètre a été mesuré à environ



10 reprises dans Pointstream pour chacune des branches afin d'évaluer le diamètre minimal et maximal observé pour les branches 1 et 3. On constate que la forme des branches s'approche davantage d'une ellipse que d'un cercle.



**Figure 30 Branche 1 : rouge**

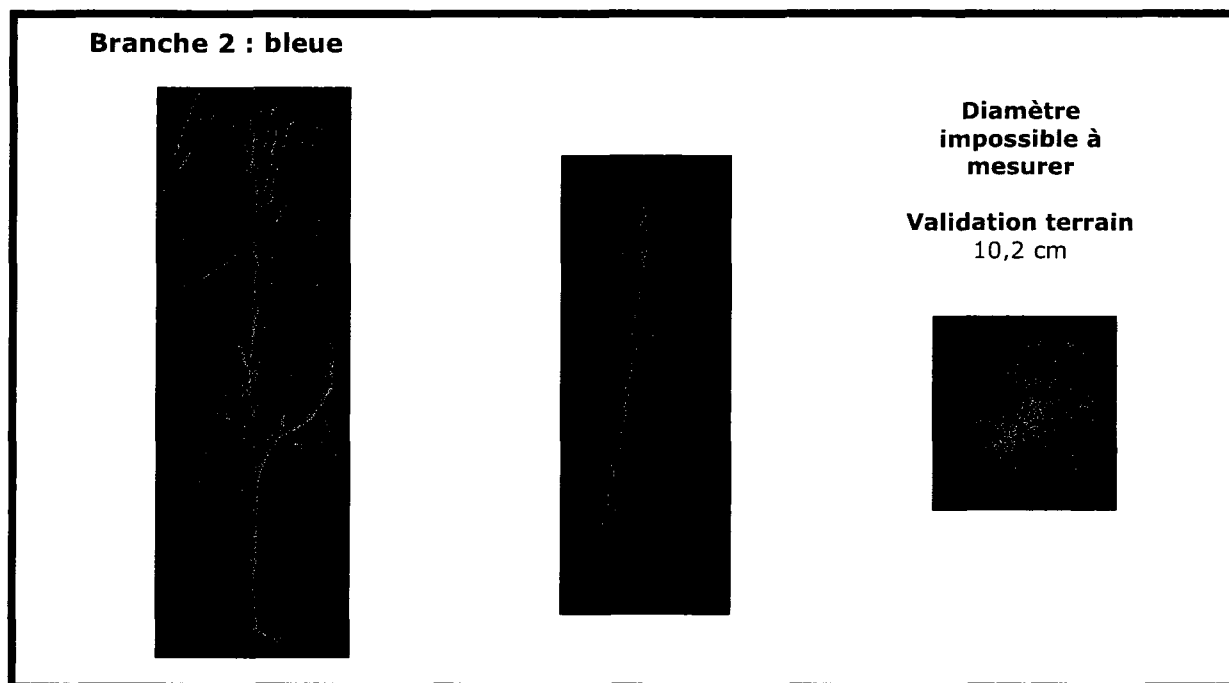


Figure 31 Branche 2 : bleue

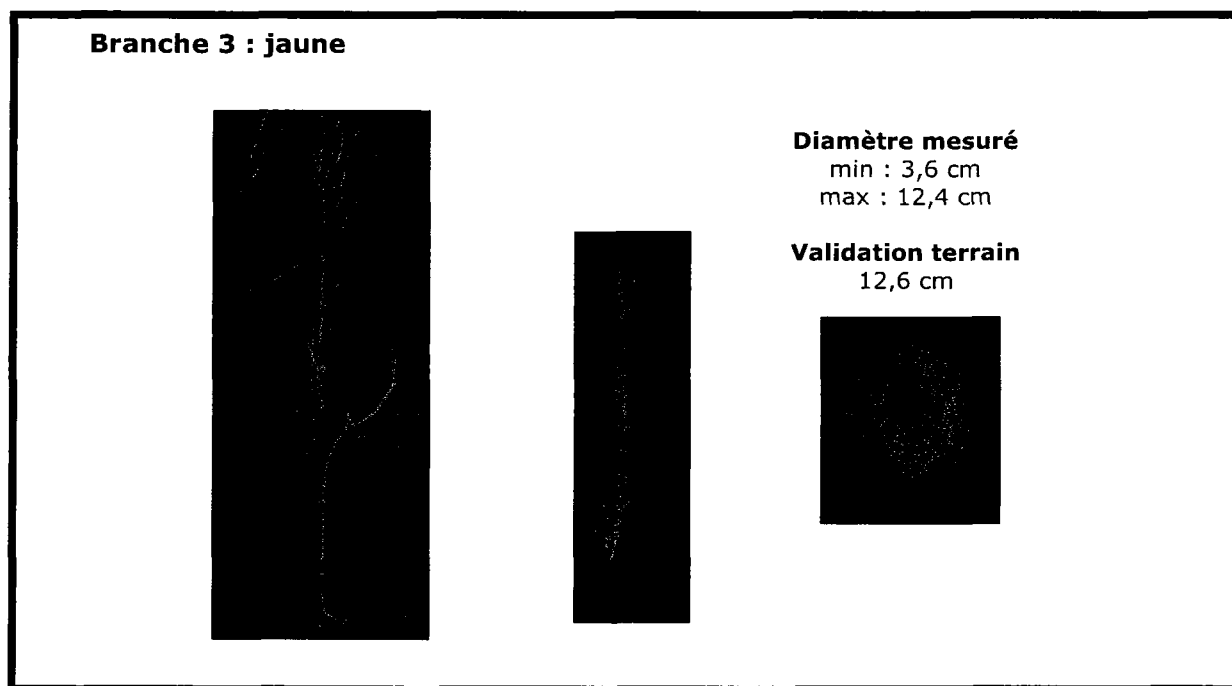


Figure 32 Branche 3 : jaune

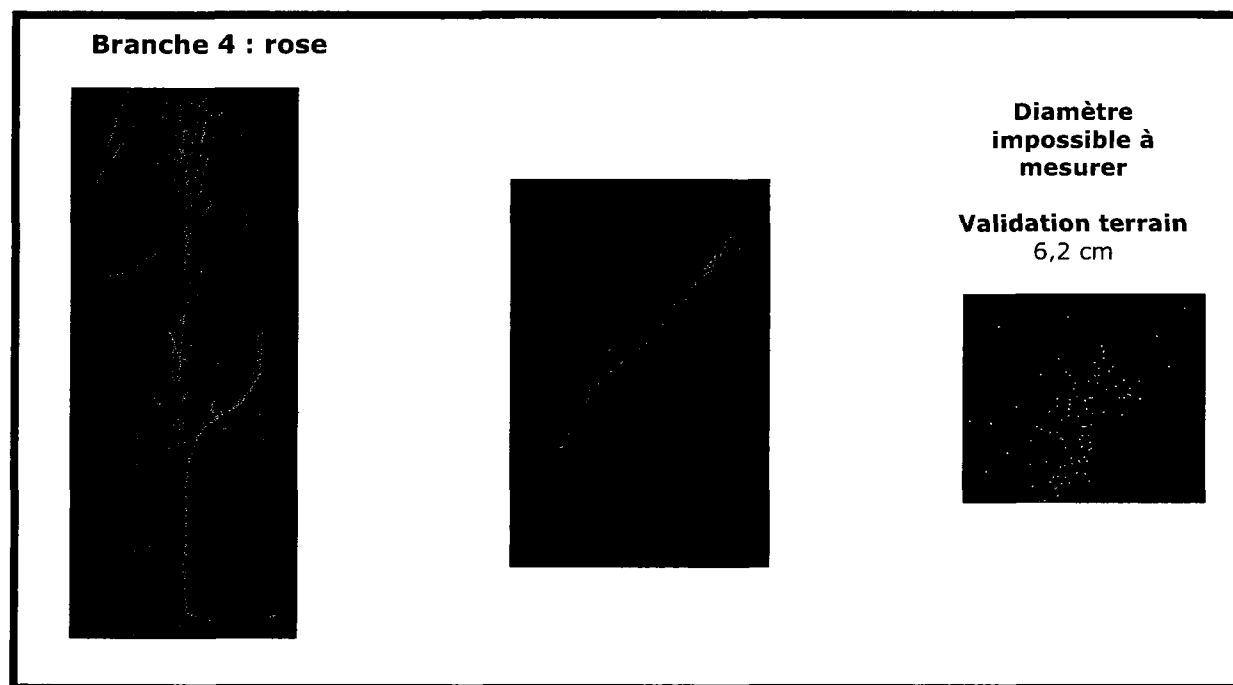


Figure 33 Branche 4 : rose

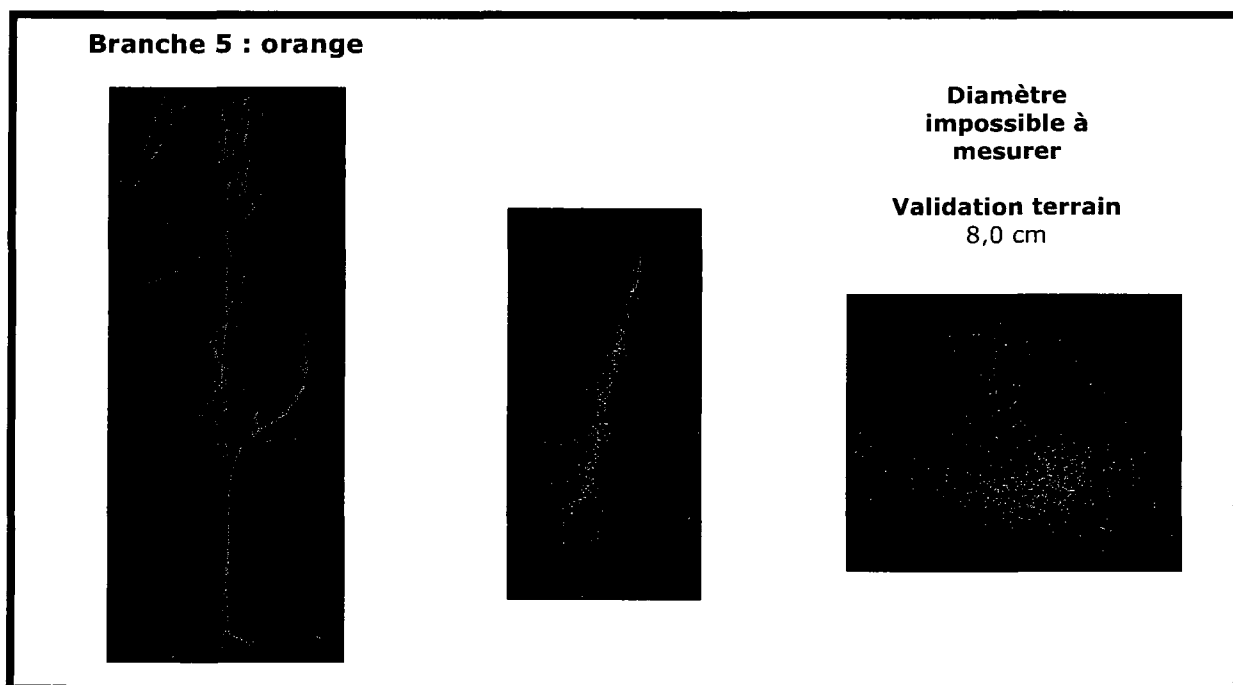


Figure 34 Branche 5 : orange

## 6. DISCUSSION

L'objectif général de ce projet portait sur l'étude de la capacité du lidar terrestre pour la mesure de métriques relatives aux tiges des arbres, soit la hauteur, le DHP et le défilement de la tige, et ce, dans des milieux naturels hétérogènes. Pour ce faire, les résultats obtenus par le logiciel Autostem et R-Routine ont été confrontés entre eux ainsi qu'avec les données de validation terrain. La discussion qui suit permettra de **faire le point sur les hypothèses** formulées initialement, de faire le **bilan des forces et limites** de l'étude et de discuter des relations entre ce projet de recherche et les **travaux antérieurs**, et ainsi, à la lumière de cette analyse, de **proposer un protocole de prise de mesures** adapté aux inventaires forestiers en milieu naturel hétérogène.

### 6.1 Interprétation des résultats

L'étude menée a démontré que le traitement de nuages de points provenant de données du lidar terrestre permettait d'évaluer des paramètres relatifs à la structure de l'arbre en milieu naturel hétérogène, et vient par le fait même vérifier l'hypothèse principale formulée à cet égard. Parmi ces paramètres, notons la hauteur, le DHP et le défilement de la tige de 39 arbres situés dans des peuplements naturels et hétérogènes de la Gaspésie ainsi que des peuplements matures et homogènes de l'Allemagne.

#### 6.1.1 Hypothèse 1 - mesures des métriques : hauteur, DHP et volume

Les travaux d'Hopkinson *et al.* (2004) nous avaient menés à poser l'hypothèse que les métriques tels le DHP, la hauteur et le volume de la tige peuvent être mesurés à partir de données provenant de lidars terrestres pour des peuplements hétérogènes.

Quant à la hauteur, le logiciel Autostem a permis d'obtenir, sur les 21 défilements à l'étude (7 conifères, 14 feuillus) en milieu hétérogène, une sous-estimation moyenne de 0,5 m, alors que dans le cas des peuplements homogènes de l'Allemagne (18 conifères), il s'agit d'une sous-estimation moyenne de 1,1 m. Avec R-Routine, il s'agit de surestimation moyenne de 0,5 m et 0,1 m respectivement. Bref, **qu'il s'agisse d'un peuplement hétérogène ou homogène, il a été possible d'évaluer la hauteur des tiges avec une précision globale de -0,8 m (2,3%) avec Autostem et 0,3 (2,0%) avec R-Routine.** La précision des données lidars et des outils traditionnels d'inventaire, tel le clinomètre électronique, est du même ordre de grandeur. Avec des données de validation plus précise, nous pourrions être en mesure d'évaluer de façon plus juste la précision des données lidar. La mesure obtenue, avec les deux logiciels et de façon conventionnelle sur le terrain

correspond à celle de la hauteur, soit la distance entre le niveau le plus élevé du sol et l'extrémité de la plus haute pousse de l'arbre, et non de la longueur effective de la tige, qui diffère de la hauteur si l'arbre est incliné.

Le DHP est une seconde métrique qui a été évaluée à l'aide des deux logiciels et comparée aux données de validation. Avec le logiciel Autostem, une sous-estimation moyenne de 5,8 cm a été observée pour les DHP de peuplements hétérogènes, comparativement à 6,5 cm pour les peuplements homogènes, alors qu'avec le logiciel R-Routine, la tendance est inversée, soit une surestimation de 3,5 cm pour les arbres de peuplements hétérogènes et 3,0 cm pour ceux de peuplements homogènes. Il s'agit là d'une différence considérable entre les deux logiciels quant au DHP, paramètre d'importance lors d'inventaire forestier. Néanmoins, tout comme pour la hauteur, **l'erreur moyenne du DHP en milieu hétérogène et homogène dans le cadre de cette étude semble comparable, et ce, sans égard au logiciel utilisé.**

Afin d'évaluer le DHP, les trois autres approches proposées (méthode de l'ellipse par régression linéaire, celle du B-spline et de PointStream) permettent d'obtenir des résultats similaires entre elles et avec le logiciel Autostem, et ce, sans différence significative. On pourrait éventuellement se pencher davantage sur la précision de l'évaluation du diamètre par une approche B-spline aussi appelée courbe à forme libre (*free form curve*), tel que proposée par l'étude de Pfeifer and Winterhalder (2004). Cette méthode permet l'approximation, ou l'interpolation d'un ensemble de points par la création d'une forme suivant la dispersion des points, circulaire ou non.

Finalement, le troisième paramètre de l'hypothèse se réfère au volume de la tige. Afin de calculer le volume, il importe tout d'abord d'évaluer le défilement, paramètre auquel nous nous sommes limités dans le cadre de cette étude. De la même façon que le DHP a été évalué, le diamètre de la tige à différentes hauteurs a été évalué afin de recréer le plus fidèlement possible le défilement réel de celle-ci. Diverses contraintes, que ce soit l'occlusion ou la faible densité des points par exemple, ont empêché de telles mesures jusqu'à l'extrémité supérieure de la tige. Afin de reconstruire la tige à partir des diamètres évalués, une interpolation *spline* a été appliquée aux données mesurées, et à partir de la hauteur déterminée précédemment, chacune des tiges a été recréée. À partir de ces défilements, le volume pourrait être évalué à partir de l'une ou l'autre des équations présentées à la section 2.1.4. Contrairement à ce qu'on aurait pu s'attendre, **les erreurs du défilement obtenues**

**pour les arbres sélectionnés en milieu hétérogène, sont légèrement inférieures à celles en milieu homogène** dans le cadre de cette étude portant sur 15 arbres en milieu hétérogène et 14 arbres en milieu homogène. Cette différence est de 4,4 cm en moyenne avec Autostem et 0,5 cm avec R-Routine.

Ceci valide la première hypothèse que les métriques tels le DHP, la hauteur et le volume de la tige peuvent être mesurées à partir de données provenant de lidars terrestres pour des peuplements hétérogènes au même titre que des peuplements homogènes. Cependant, il est important de noter que dans le cadre de ce projet, bien que l'ensemble des placettes ait été scanné, une attention particulière était portée afin d'optimiser les prises de vues des cinq arbres de validation, tant pour les conifères que les feuillus. D'autre part, les mesures ont été réalisées avant le débouffrage des feuilles, et ce, afin d'éviter l'occlusion des branches et des tiges par celles-ci.

### **6.1.2 Hypothèse 2 - défilement de la tige**

La seconde hypothèse est que le défilement de la tige peut être mesuré avec une précision de l'ordre du centimètre (Pfeifer et Winterhalder, 2004). Cette hypothèse n'a pu être validée. En effet, avec les deux logiciels, **l'erreur obtenue sur le défilement des arbres situés en milieu hétérogène et homogène est située entre 3 et 6 cm**. Cela s'approche davantage des travaux Thies and Spiecker (2004) où une précision de 3,5 cm avait été obtenue pour le DHP. Ces résultats peuvent en partie être expliqués par diverses limites qui seront détaillées à la section 6.2.

### **6.1.3 Hypothèse 3 - potentiel d'opérationnalité de la méthode d'inventaire**

La troisième hypothèse formulée est que le lidar terrestre présente un potentiel de développement de protocoles opérationnels en milieu forestier et d'automatisation (Klemmt et Tauber, 2008 ; Treemetrics, 2008). Grâce aux deux logiciels, Autostem et R-Routine, et aux travaux terrain menés dans divers types de peuplement pour la prise de mesures, **le potentiel du lidar terrestre en milieu forestier à une fois de plus été démontré** en raison de plusieurs forces majeures. Cependant, tel qu'il sera discuté à la section suivante, ce potentiel est contraint par diverses limites, que ce soit au point de vue des aspects pratiques ou techniques du lidar.

## 6.2 Forces et limites du lidar

Les résultats présentés précédemment proviennent d'une étude comparant deux types de milieux (homogène et hétérogène), et deux algorithmes de traitement des nuages de points (Autostem et R-Routine). Bien que cette étude puisse être améliorée à plusieurs égards, elle démontre néanmoins le potentiel d'application du lidar terrestre dans le cadre d'une gestion adaptée à la réalité forestière, avec ses forces et ses limites.

L'utilisation du lidar terrestre en milieu forestier représente un attrait pour les chercheurs et les décideurs. Cependant, le **coût d'achat et de location élevé** du lidar terrestre représente un investissement majeur qui peut freiner son utilisation, et ce, malgré le potentiel d'opérationnalité de l'appareil en milieu forestier. En fait, l'amortissement de cette dépense dépend en partie de l'efficacité d'extraction des métriques recherchées. Comme le lidar augmente la capacité de mesures de nombreux paramètres forestiers (diamètres de la tige sans abattre les arbres, suivi temporel, etc.), il va s'en dire que le coût d'achat ou de location pourrait rapidement être rentabilisé. Nonobstant cette limite monétaire, le lidar terrestre présente plusieurs points forts face aux inventaires traditionnels.

D'un côté pratique, le lidar permet une **représentation 3D des peuplements** avec une précision de l'ordre du millimètre. Cette représentation permet de visualiser le peuplement dans son ensemble et d'analyser les paramètres d'intérêt à l'étude. D'autre part, **les données lidars peuvent être conservées** et éventuellement être traitées à nouveau afin d'extraire d'autres paramètres avec des algorithmes, ou de faire un **suivi temporel** de l'évolution d'un peuplement. Une autre force du lidar terrestre par rapport aux inventaires traditionnels est la **reproductibilité des résultats**. En fait, les données enregistrées ne sont pas subjectives en fonction de l'opérateur. D'autre part, l'utilisation du lidar terrestre permet d'obtenir la **reconstruction des tiges**, et d'évaluer le défilement de la tige, avec une relativement bonne précision, **sans abattre les arbres**, comme il est souvent le cas avec les inventaires traditionnels (Pfeifer and Winterhalder, 2004).

D'un côté plus technique, le **temps d'acquisition** de certains appareils, (FARO et RIEGL par exemple) qui ne nécessitent qu'une dizaine de minutes par station de 360 degrés, représente un atout majeur de cette technologie, d'autant plus que certains appareils (FARO, Zoller+Fröhlich, Leica) peuvent être transportés sur le terrain sans trop de difficulté par un ou deux opérateurs. Cependant, **l'accessibilité aux sites d'inventaire** peut limiter l'utilisation de certains modèles (Iris-3D, RIEGL) dont le **poids et la taille imposante de**

**l'appareil** limitent les déplacements. Sans égard au type d'appareil, la prise de mesure peut être effectuée peu importe les **conditions d'éclairement**. Cependant, en présence de pluie son utilisation est limitée, voir impossible. De plus, en présence de **vent**, le mouvement des arbres peut entraîner un décalage quant à la position des tiges et des branches, ce qui influencera l'analyse des données, entraînant ainsi une sous-estimation ou surestimation des paramètres, de même qu'une difficulté supplémentaire lors de l'assemblage des scans entre eux. Une autre limite majeure est le **feuillage ou le sous-bois important** qui peut limiter la visibilité des tiges, de même que **l'ombrage mutuel** qui peut limiter l'analyse de l'information de certains arbres. Ainsi, selon le but de l'étude, il peut s'avérer avantageux d'effectuer des visés de différents points de vue d'un même peuplement, afin de contrer cette problématique et permettre une bonne analyse de l'ensemble de la placette étudiée.

Le **potentiel d'automatisation de l'extraction des paramètres** représente une force incontestable du lidar terrestre en milieu forestier. Cependant, le manque de logiciels de traitement des données limite la pleine exploitation de l'utilisation de l'appareil pour l'évaluation des métriques des arbres. En fait, tel que constaté avec Autostem et R-Routine, le développement de logiciels s'avère fort prometteur pour le domaine forestier. En ce sens, les efforts doivent être dirigés en vue de permettre l'extraction efficace de l'information recherchée, afin qu'elle soit la plus précise et complète qu'il soit, en fonction des besoins.

### **6.2.1 Mesure : peuplements hétérogènes vs homogènes**

Les forces et limites du lidar terrestre en milieu forestier varient d'un peuplement à un autre, en fonction du type de peuplement, l'âge, la densité, de la pente, etc. Pour les deux sites d'étude, soit la Gaspésie (hétérogène) et l'Allemagne (homogène), plusieurs différences sont ressorties. Tout d'abord, **l'accès au site** était quelque peu plus difficile dans les placettes de la Gaspésie en raison de la présence d'un sous-bois important. D'autre part, la présence du **sous-bois** obstruait la visibilité de la partie inférieure des tiges. Comme la présence de feuillus étaient importantes en Gaspésie, il a fallu s'assurer de prendre les mesures avant le **débouillage des feuilles** afin d'assurer une meilleure visibilité des tiges et des branches. En Allemagne, comme il s'agissait de peuplement mature de conifères, l'acidité du sol ainsi que la densité du couvert faisait en sorte qu'il n'y avait pas de plante ou d'arbuste. Pour ce qui est de l'acquisition des données, la durée est similaire dans les deux cas, hormis l'installation des cibles et la position des stations pour les points de vue qui nécessitait un peu plus de temps en milieu hétérogène.



Quant au traitement et au prétraitement, l'**assemblage** était plus laborieux pour les placettes de la Gaspésie en raison du sous-bois tel que mentionné précédemment. Il s'avérait parfois difficile, voir impossible, d'obtenir un bon alignement, principalement lorsqu'en plus, la présence de vent occasionnait le mouvement des branches. Tel que présenté à la Figure 35, l'alignement de certaines tiges a pu mener à une sous-estimation lors de l'évaluation du diamètre.



**Figure 35 Difficulté d'assemblage**

Une autre différence majeure réside dans le temps de traitement. En fait, pour une placette homogène de peuplement de conifères matures, les résultats étaient obtenus beaucoup plus rapidement, soit moins de 10 minutes avec Autostem pour une placette et environ 30 secondes par arbre avec R-Routine. Quand aux placettes de la Gaspésie, Autostem pouvait prendre jusqu'à 6 heures de traitement, et le traitement avec R-Routine était d'environ 30 à 60 secondes.

### **6.2.2 Hauteur**

La hauteur présente généralement une sous-estimation. Hopkinson et al (2004) associe cette sous-estimation systématique à l'effet d'ombrage du couvert et de la distribution sous-optimale de l'échantillonnage dans la partie supérieure du couvert. En fait, la mesure de la hauteur de la tige en milieu forestier très dense peut représenter une contrainte, puisqu'il peut s'avérer difficile d'obtenir une quantité de points suffisant à l'extrémité supérieure pour déterminer correctement la hauteur de la tige. Toutefois, la mesure de la longueur de la tige est une mesure fiable pour évaluer la valeur du bois sur pied.

### **6.2.3 DHP**

Une différence entre 3 et 6 cm en moyenne a été observé avec les deux logiciels par rapport aux données de validation sur le terrain quant à la mesure du DHP. Ceci peut être occasionné par la forme circulaire de la tige, puisque le faisceau du lidar qui atteint la bordure de celle-ci fournit une distance et intensité inexacte, qui tend généralement vers une sous-estimation du DHP (Thies and Spiecker, 2004). D'autre part, l'irrégularité dans la circularité de la tige peut résulter en une évaluation du DHP erronée. Cela peut être en

partie corrigé en scannant l'arbre de plusieurs points de vue, tel qu'il a été fait dans le cadre de cette étude. L'irrégularité peut également influencer les données de validation terrain acquises par les techniciens forestiers. Dans le cadre de l'étude en Gaspésie, une seule mesure de validation était prise, alors que trois mesures étaient réalisées en Allemagne, tenant ainsi davantage compte de la variation. Comme trois à quatre points de vue ont été utilisés pour chacune des placettes, l'alignement représente une étape importante. Or, comme mentionné précédemment (Figure 35), l'alignement en Gaspésie a parfois été plus complexe, ce qui peut mener à la surestimation ou sous-estimation du diamètre.

Les trois nouvelles approches proposées pour évaluer le DHP, soient l'ellipse, le B-Spline et l'approche manuelle d'Autostem, ont produit des erreurs sur l'évaluation du DHP dont la différence est non-significative (Section 5.4). Ainsi, peu importe l'approche favorisée, l'erreur reste inférieure à celle obtenue avec Autostem et R-Routine.

#### **6.2.4 Surface terrière**

Tel que mentionné précédemment, l'erreur DHP est importante lors de l'évaluation de la surface terrière, puisque l'équation de cette dernière a comme seul intrant la valeur du DHP élevé au carré. Ainsi, on comprend rapidement l'importance que peut avoir une évaluation juste et précise lors de l'évaluation du DHP.

#### **6.2.5 Défilement**

Pour ce qui est du défilement, la mesure des divers diamètres le long de la tige présente d'une part les mêmes forces et limites que celle du DHP. En fait, la mesure du défilement constitue une extension de la mesure du diamètre du tronc de l'arbre en haut et en bas du 1,3 m du DHP. Cependant, en Gaspésie, la longueur de tige visible était beaucoup plus courte que sur les arbres localisés en Allemagne. En fait, les arbres mesuraient environ 19 m en Gaspésie, comparativement aux tiges de l'Allemagne qui avait une hauteur d'environ 35 m. La présence de branches dans les arbres de la placette et celles des arbres visés obstruait également une bonne partie des tiges de la Gaspésie, de même que le sous-bois important. Un aspect intéressant du défilement consiste en l'identification des imperfections sur la tige ou l'évaluation de l'ovalité de celle-ci. Bien que ces paramètres n'aient pas fait l'objet de la présente étude, le lidar présente un potentiel intéressant pour leur évaluation. Pour ce qui est des imperfections, il faudra prévoir une résolution assez fine, de quelques millimètres, afin de pouvoir détecter les irrégularités, principalement si elles sont de petites tailles. Pour ce qui est de l'ovalité du tronc, il est facilement pensable de programmer un

algorithme permettant de détecter un changement dans l'orientation de la tige, et d'en évaluer le décalage, par exemple.

### **6.2.6 Volume**

L'estimation du volume à partir des mesures de défilement obtenues par Autostem et R-Routine a mené à des résultats considérablement différents entre les deux logiciels, mais identique pour un même logiciel sans égard à l'équation utilisée (Smalian ou tronc de cône). Les résultats obtenus sont directement reliés à l'évaluation des diamètres le long de la tige.

Les volumes obtenus ne peuvent être confrontés avec l'évaluation basée sur des modèles allométriques dont l'intrant est le DHP évalué sur le terrain pour fins de validation. En fait, l'évaluation d'un tel volume exige une expertise dans le domaine et est loin d'être une démarche triviale (Ung, 2010). Il pourrait s'agir d'un objectif qui sera mis de l'avant dans le cadre de travaux ultérieurs portant sur la quantification des erreurs des volumes prédits par des modèles allométriques en comparaison avec les erreurs que l'on obtient avec les données provenant d'un lidar terrestre.

### **6.2.7 Diamètre des branches**

Les résultats présentés pour l'évaluation des branches nous ont d'abord fait prendre conscience du premier défi : l'identification des branches. Lors de cette étude, il s'est avéré laborieux de trouver les branches et de déterminer à quel arbre elles appartenaient. Quant au second défi, il réside dans la quantité d'information lidar disponible sur les branches. En fait, en raison de leur position élevée, les branches ne peuvent être scannées de tout côté, et ainsi, il est impossible d'obtenir des points pour la partie supérieure des branches. De plus, l'angle et la distance entre le lidar et les branches mène à une faible densité de points. Cela est d'autant plus accentué en raison de l'occlusion des branches supérieures par les branches inférieures, qui devient plus important lorsque l'on pénètre dans la cime de l'arbre. Cependant, il est important de mentionné qu'en termes de qualité de la tige, évaluée lors d'inventaires forestiers, seules les branches inférieures et de diamètres importants ont une importance pour le classement de la tige.

## **6.3 Protocoles de prise de mesures**

À la lumière des résultats et des sections précédentes de la discussion, des recommandations pour un protocole de prise de mesures optimale dans le cadre d'inventaires forestiers peuvent être formulées. Ce protocole devra être adapté en fonction

des objectifs recherchés et être modifié au besoin. Il a été établi afin de déterminer les mêmes paramètres que ceux étudiés dans le cadre de la présente étude, soit la hauteur, le DHP et le défilement.

### **6.3.1 Choix de l'appareil**

Le choix d'un appareil permettant de répondre aux objectifs est primordial. À cet égard, dans le but de scanner une placette définie, il est préférable d'utiliser un modèle panoramique ; modèle fort utile lorsque la vue d'un hémisphère est recherchée (section 2.2.2). L'IMAGER 5006 de Z+F en est un exemple. Le LMS-Z360 de RIEGL, de type hybride avec une tête rotative s'avère également intéressant pour ce type de scan. L'avantage du modèle panoramique est de limiter le nombre de scans (un par station si placé au centre de la placette au lieu de 20 à 30 par station avec un mode caméra), et ainsi faciliter l'alignement ultérieur et limiter les erreurs qui pourraient en découler. Cependant, lorsqu'un seul arbre doit être scanné, le modèle caméra, tel l'ILRIS-3D d'Optech, est approprié et largement suffisant avec son angle de visé de 40 x 40 degrés. Il en est de même lorsque le site d'étude peut être observé d'une distance de plusieurs mètres à l'extérieur de ses limites, puisqu'ainsi, l'angle de vue de 40 degrés peut être suffisant pour couvrir la zone d'étude, et ce, en 2 ou 3 scans.

### **6.3.2 Période de scan**

La période de scan joue un rôle important, principalement en présence de feuillus, tant dans la strate arbustive qu'arborée. Il importe de choisir une période où les arbres sont dépourvus de feuilles. Il est également souhaitable que le sol soit visible, afin de reconstituer le MNA et d'évaluer la hauteur (exemple 1,3 m pour le DHP). De ce fait, l'été n'est pas propice en raison des feuilles, et l'hiver en raison du couvert nival. Ainsi, le printemps et l'automne au Québec sont appropriés pour les scans, soit durant la période où les feuilles d'arbres et d'arbustes feuillus ne sont pas présentes. Pour ce qui est des peuplements de conifères, s'il y a absence de strate feuillue, la période de l'année ne représente pas une contrainte, mis à part le couvert nival en saison hivernale.

### **6.3.3 Conditions météorologiques**

Suite à l'expérience terrain acquise lors de ce projet de recherche, il s'est avéré préférable de ne pas réaliser de scan en présence de vent moyen ou fort. En fait, le mouvement des arbres occasionné par la force du vent complique le processus d'alignement des scans, et peut même dans certains cas empêcher l'alignement, en plus d'occasionner un décalage qui a pour effet de sous-estimer ou surestimer le diamètre selon le cas.

### **6.3.4 Préparation du site d'étude et alignement**

Afin de faciliter le processus d'alignement, il est primordial d'installer des cibles à l'intérieur de la placette. Selon le modèle d'appareil utilisé et le logiciel, certaines cibles sont suggérées par les compagnies de lidar. Pour retrouver le centre des placettes, une solution proposée est d'y installer un trépied ou une cible numérotée. En raison des angles des pattes du trépied, il s'avère relativement simple de le retrouver par la suite, comparativement à une tige rectiligne qui pourrait se confondre avec les arbres. L'utilisation de ruban métallique directement sur les arbres n'est pas souhaitable. En fait, il a été observé à plusieurs reprises au cours de cette étude, qu'à l'endroit où le ruban était installé, il y avait absence de points (Figure 36).



**Figure 36 Impact du ruban métallique**

Le choix de la position des cibles (ballon, trépied, boîte, réflecteur), doit, de préférence être fait en fonction des prises de vue qui seront utilisées pour scanner la placette. En fait, les cibles doivent être visibles d'au moins deux stations afin de servir à l'alignement des scans. Le choix des stations doit être de les répartir en périphérie de la placette, tel que présenté à la Figure 14 ainsi qu'à des hauteurs différentes afin d'assurer un alignement adéquat. En fonction de la densité du couvert et de la configuration des trouées dans le peuplement, le choix du nombre de stations devra être fait, 3, 4 ou 5 stations par exemple. Un protocole d'alignement peu difficilement être établis de façon générale. En fait, en fonction de

l'appareil utilisé, les outils disponibles pour l'assemblage des scans peut varier selon le fournisseur de l'appareil.

### **6.3.5 Extraction des arbres et des paramètres**

L'extraction des arbres peut se faire de façon manuelle en observant les données et en ciblant les arbres individuels pour ensuite extraire le nuage de points correspondant. Cependant, il va s'en dire que le développement d'une méthode automatisée s'avère optimale lors de l'étude de placettes forestières. Ainsi, pour l'extraction primaire des arbres, la création d'un cylindre centré sur la tige est la première étape à réaliser. Pour ce faire, les deux logiciels utilisés lors de cette étude proposent de réaliser des coupes à diverses hauteurs dans le plan horizontal et identifier les formes circulaires. Ainsi, si les formes correspondent dans un axe vertical, elles sont associées à un arbre et un cylindre est ainsi créé. Afin d'extraire l'arbre et d'éliminer le plus de bruits sur les données, il faut éventuellement prévoir éliminer les branches des arbres en périphérie ainsi que les points reliés au sous-bois. C'est en partie en ce sens que les efforts de travaux futurs devront être déployés pour éventuellement permettre la détermination des paramètres structuraux et l'optimisation de ceux-ci.

## **7. CONCLUSION**

Bien qu'à la suite de cette étude il soit trop tôt pour conclure à une méthode d'inventaire standardisée, il a été néanmoins possible de tirer des conclusions démontrant une fois de plus le **potentiel du lidar terrestre en milieu forestier**, et principalement en milieu naturel hétérogène. Deux logiciels d'extraction des paramètres ont également été confrontés, et il appert qu'avec chacun d'eux, les résultats obtenus en milieu hétérogène et en milieu homogène sont similaires. Pour ce qui est de la hauteur, elle a pu être évaluée à une précision de l'ordre du mètre. Quant au DHP, avec Autostem une sous-estimation d'environ 6 cm a été observée, alors qu'il s'agit d'une surestimation d'environ 3 cm avec R-Routine. Et pour ce qui est du défilement, on observe que les erreurs du défilement obtenues en milieu homogène sont légèrement inférieures à celles en milieu hétérogène. L'intérêt de cette étude ne se limite pas seulement au fait d'avoir obtenu des mesures de paramètres de structure de l'arbre, mais également au fait que ces paramètres ont été mesurés de façon automatique.

Cette étude s'ajoute aux études précédentes menées par Hopkinson *et al.* (2004), Pfeifer et Winterhalder (2004), Thies and Spiecker (2004), Bienert *et al.* (2006). Bien que les

méthodes différent, de même que les types de peuplements considérés, tous s'entendent sur le potentiel du lidar terrestre afin de bonifier les inventaires terrain en milieu forestier. L'utilisation de nouvelles technologies est en constante évolution afin d'**améliorer la qualité** des données, d'acquérir de **nouveaux paramètres**, et ce, tout en réduisant les coûts et le temps d'acquisition des données. Une des forces du lidar terrestre en comparaison avec les inventaires traditionnels réside dans les **multiples utilisations** qui peuvent être faites d'un scan, que ce soit pour l'évaluation du volume de bois ou l'analyse du changement au fil des ans, par exemple, de même que l'acquisition des données et l'analyse automatisée qui **sont non-subjectives**. **D'autres paramètres** de géométrie d'intérêt pourraient être étudiés lors de travaux ultérieurs : l'ovalité du tronc, les dommages et irrégularités du tronc, la hauteur de la couronne et le diamètre des branches, par exemple. De plus, des paramètres sur l'ensemble de la placette pourraient faire l'objet d'éventuels travaux de recherches tels la surface terrière totale ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) et la densité (nombre de tiges/ha). Cette étude a également permis de démontrer que pour les branches, le défi réside principalement dans leur identification automatique. En fait, comme les branches sont situées en hauteur, elles ne peuvent être scannées de tous les cotés, et plus la distance avec le lidar est grande, plus la densité de points est faible, de même que l'importance de l'occlusion des branches supérieures par les branches inférieures.

Comme les techniques d'inventaire traditionnelles sont basées sur des parcelles couvrant des superficies restreintes en nombre d'hectares et en quantité, cette étude a permis de démontrer que le lidar terrestre s'avère un outil prometteur pour l'acquisition de données fiables et précises sur des paramètres de structures des arbres et de la placette. Ces données pourraient être combinées avec les données aéroportées, qui elles, couvrent généralement de grandes surfaces, mais étant limitée quant aux paramètres mesurés. Ainsi, le lidar terrestre pourrait servir à faire le **lien entre les inventaires au sol et ceux avec le lidar aéroporté**. En fait, le lidar pourrait permettre de mesurer la structure fine de la forêt d'une manière quantitative qui ne serait possible d'autre façon, sans l'abatage des arbres. En conclusion, la présente étude a permis de démontrer le potentiel du lidar terrestre en milieu forestier. Cependant, afin de parvenir à des résultats fiables et précis sur la structure des arbres et du couvert forestier, le défi majeur réside dans le développement d'algorithmes qui pourront tirer profit de la richesse des données lidar disponibles. Ainsi, les travaux futurs devront se concentrer sur le développement de ces algorithmes qui permettront d'isoler les arbres et de mesurer les paramètres structuraux associés.

## 8. RÉFÉRENCES

AMFE (2010) Fiche forestière – Surface terrière, Association forestière des Cantons de l'Est. [http://www.afce.qc.ca/references\\_utiles/docs/fiches-forestieres/11\\_Surface\\_terriere.pdf](http://www.afce.qc.ca/references_utiles/docs/fiches-forestieres/11_Surface_terriere.pdf) (Page consultée le 17 août 2010).

Aschoff, T. and Spiecker (2004) algorithms for the Automatic Detection of Trees in Laser-Scanner Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-8/W2, p.71-75.

Arius 3D (2009) PointStream Imaging Software. *in* Product/Services, Arius3D Digital Imaging Solutions. <http://www.arius3d.com/main.html?contentId=6> (Page consultée le 10 juillet 2009).

Bégin, J. (2006) Notes de cours de dendrométrie, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 229p.

Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mullooly, G. and Mohan, F. (2006) Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XXXVI, Part 5, 5 p.

Binot, J.-M., Pothier, D., Lebel, J. (1995) Comparison of relative accuracy and time requirement between the caliper, the diameter tape and electronic tree measuring fork. *Forestry Chronicle*, vol. 71, no 2, p. 197-200.

Burridge, E., Hopkinson, C., Churchill, J., Chasmer, L. (2008) Forest Resource Inventory and Forest Metrics from Lidar Comparison Project. Applied Geomatics Research Group <http://agrg.cogs.nsc.ca/node/77> (Page consultée le 27 août 2009).

Fröhlich, C., Mettenleiter, M. (2004) Terrestrial laser scanning – New perspectives in 3D surveying. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, part 8/W2, p.7-12.

Hollaus, M., Wagner, W., Maier, B., Schadauer, K (2007) Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. *Sensors* 2007, 7, 1559-1577.

Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., and Treitz, P. (2004) Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, p. 573-583.

Innes, J.C., Ducey, M.J., Gove, J.H., Leak, W.B., Barrett, J.P. (2005) Size-density metrics, leaf area, and productivity in Eastern white pine. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 35, no 10, p.2469-2478.

Klemmt, H.-J. and Tauber, R. (2008) Automatisierte Ermittlung forstinventurelevanter Parameter aus 3D-Laserscanning - Daten sowie aus 2D-DendroScandaten – Eine vergleichende Feldstudie. *DVFFA – Sektion Ertragskunde*, p.169-179.

Korol, R.L., Running, S.W., Milner, K.S. (1995) Incorporating intertree competition into an ecosystem model. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 25, no 3, p.413-424.



Leblanc, S. (2010) Communication personnelle. Département de géomatique appliquée. Université de Sherbrooke (Sylvain.LebLANC@USherbrooke.ca)

Lichti, D.D., Gordon, S.J. and Stewart, M.P. (2002) Ground-based laser scanners : operation, systems and applications. *Geomatica*, vol. 56, p.21-33.

Mattern, B. (1956) On the geometry of the cross section of a stem, *Medd. Statens, Skogsforskningsinst*, vol 46, p.1-28.

Mimizan, C.C. (2009) Lexique bois *in* Boîte à outils *in* Le pin des Landes Mimizan [http://www.mediaforest.net/page.php?id\\_rubrique=31&lettre=D](http://www.mediaforest.net/page.php?id_rubrique=31&lettre=D) (Page consultée le 27 août 2009)

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2008b) L'inventaire forestier au Ministère. *in* Ressources naturelles et Faune, Les forêts, Connaissances forestières et environnementales. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire.jsp> (Page consultée le 1<sup>er</sup> juillet 2008).

Monserud, R.A., and Marshall, J.D. (1999) Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29, no5, p. 521-535.

Optech (2008) About Lidar. <http://www.optech.ca/aboutlaser.htm> (Page consultée le 1<sup>er</sup> juillet 2008).

OIFQ Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (2009) Manuel de foresterie, nouvelle édition entièrement revue et augmentée, Éditions Multi Mondes, Canada.

Parent, B. et Fortin, C. (2007) Ressources et industries forestières. Portrait statistique édition 2007, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers.

Pfeifer, N. and Winterhalder, D. (2004) Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, part 8/W2, p.76-81.

Ressources naturelles Canada (2007) Foire aux questions. *in* Inventaire forestier du Canada (Canfi) 2001, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. <http://scf.rncan.gc.ca/soussite/canfi/faq-canfi> (Page consultée le 1<sup>er</sup> juillet 2008).

RIEGL (2009) TLS RiSCAN PRO. *in* Download, RIEGL Laser Measurement Systems. <http://www.riegl.com/download/?nav=browse&category=TLS:%20RiSCAN%20PRO> (Page consultée le 10 juillet 2009).

Rondeux, J. (1993) La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 521p.

Shan, J. and Toth, C.K. (2009) Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC-Press, 590p.

Thies, M., Spiecker, H. (2004) Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, part 8/W2, p.192-197

Treemetrics (2008) About us. *in* Treemetrics, Irlande (Page consultée le 1<sup>er</sup> juillet 2008)

Ung, C-H. (2008) Communication personnelle. Centre canadien sur la fibre de bois, Service canadien des forêts.

Ung, C-H. (2010) Communication personnelle. Centre canadien sur la fibre de bois, Service canadien des forêts.

Uniphiz (2010) FindGraph. <http://www.uniphiz.com/> (Pas consultée le 20 août 2010).

## Annexe 1 Fiche terrain

## ÉCHANTILLONNAGE DE PLACETTES AVEC LE LIDAR TERRESTRE

INFORMATIONS SUR LES SONDEURS			
Nom : <u>Caroline Rivest, stagiaire M.Sc. et Julien Blanchard, stagiaire B.Sc.</u>			
Coordonnées :	<u>Université de Sherbrooke</u>	Téléphone :	<u>819-821-8000 poste 63175</u>
	<u>FLSH – Département de géomatique</u>	Télécopieur :	<u>819-821-7944</u>
	<u>Sherbrooke QC J1K 2R1</u>	Courriel :	<u>Caroline.Rivest@USherbrooke.ca</u>

DESCRIPTION DE LA PLACETTE			
Numéro :	Coordonnées GPS du centre :	/	Zone :
Type de peuplement :	<input type="checkbox"/> Feuillu <input type="checkbox"/> Mixte <input type="checkbox"/> Résineux    Hauteur moy. peuplement : _____		
Strate : _____	Densité <sup>2</sup> :	Sp. / % / haut moy :	
Strate : _____	Densité <sup>2</sup> :	Sp. / % / haut moy :	
Strate : _____	Densité <sup>2</sup> :	Sp. / % / haut moy :	
Strate : _____	Densité <sup>2</sup> :	Sp. / % / haut moy :	
Perturbations :	Pente : <input type="checkbox"/> Concave <input type="checkbox"/> Convexe <input type="checkbox"/> Régulière * _____ deg. <input type="checkbox"/> Plat		
Remarques _____			
Rayon : 11,28 m    Circonférence : 70,87 m    Superficie : 400 m <sup>2</sup> Densité 1 = <5%    2 = 5-25%    3 = 25-50%    4 = 50-75%    5 = 75-100%			

INFORMATIONS GÉNÉRALES ET CONDITIONS MÉTÉO			
Date :	Heure de début :	Heure de fin :	
Vent :	Précipitations :	Ciel :	
<input type="checkbox"/> Nul	<input type="checkbox"/> Nulles	<input type="checkbox"/> Clair	
<input type="checkbox"/> Faible	<input type="checkbox"/> Bruine	<input type="checkbox"/> Quelques nuages	
<input type="checkbox"/> Moyen	<input type="checkbox"/> Faible pluie	<input type="checkbox"/> Ciel voilé	
<input type="checkbox"/> Fort	<input type="checkbox"/> Rosée	<input type="checkbox"/> Nuageux	
<input type="checkbox"/> Autre : _____	<input type="checkbox"/> Autre : _____	<input type="checkbox"/> Couvert total	
Remarques _____			

CROQUIS
Arbres cibles : 1, 2, 3, ... / Station : S1, S2, S3, ...

[illegible][illegible]

## Annexe 2 Défilement des 39 arbres

